



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.15.14.05-TDI

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO EM ÁREAS DO
SUDESTE DO BRASIL - UM ESTUDO DE
MODELAGEM**

Priscila da Silva Tavares

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Angélica Giarolla, e Chou Sin Chan, aprovada em 31 de maio de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NSRPSP>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.15.14.05-TDI

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO EM ÁREAS DO
SUDESTE DO BRASIL - UM ESTUDO DE
MODELAGEM**

Priscila da Silva Tavares

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Angélica Giarolla, e Chou Sin Chan, aprovada em 31 de maio de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NSRPSP>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Tavares, Priscila da Silva.

T197i Impactos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro em áreas do sudeste do Brasil - Um estudo de modelagem / Priscila da Silva Tavares. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxvi + 114 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.15.14.05-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadoras : Dras. Angélica Giarolla, e Chou Sin Chan.

1. Cafeeiro arábica. 2. Produtividade. 3. Mudanças climáticas.
I.Título.

CDU 551.583:633.73



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Priscila da Silva Tavares*

"IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO EM ÁREAS DO SUDESTE DO BRASIL - UM ESTUDO DE MODELAGEM"

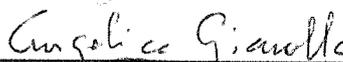
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de *Doutor(a)* em
Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Gilvan Sampaio de Oliveira



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Angélica Giarolla



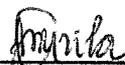
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Chou Sin Chan



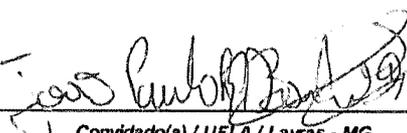
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Ana Maria Heuminski de Avila



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino
Barbosa



Convidado(a) / UFLA / Lavras - MG

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 31 de maio de 2017

Considerações de Aninha

Melhor do que a criatura,

fez o criador a criação.

A criatura é limitada.

O tempo, o espaço,

normas e costumes.

Erros e acertos.

A criação é ilimitada.

Excede o tempo e o meio.

Projeta-se no Cosmos.

CORA CORALINA

A Perfeição

O que me tranquiliza

é que tudo o que existe,

existe com uma precisão absoluta.

O que for do tamanho de uma cabeça de alfinete

não transborda nem uma fração de milímetro

além do tamanho de uma cabeça de alfinete.

Tudo o que existe é de uma grande exatidão.

Pena é que a maior parte do que existe

com essa exatidão

nos é tecnicamente invisível.

O bom é que a verdade chega a nós

como um sentido secreto das coisas.

Nós terminamos adivinhando, confusos,

a perfeição.

CLARICE LISPECTOR

*A minha família, pelo imenso carinho, compreensão
pelos momentos ausentes e apoio em todos
momentos da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar paz de espírito e fazer entender que a vida é um emaranhado de aprendizados, onde feliz é aquele que sabe lidar com todos os aspectos, sejam bons ou não.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo N° 2014/00192-0, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), projeto INCT para Mudanças Climáticas (MCTI/CNPq), pelo apoio financeiro.

As minhas orientadoras, Dras. Angélica Giarolla e Chou Sin Chan, por toda dedicação, ensinamentos, sugestões e contribuições. Ambas contribuíram enormemente para realização deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela infraestrutura e suporte computacional.

À Pós-graduação do CCST, pela oportunidade de realizar o curso de doutorado e em especial a Ângela Harada e Mariana Caroline, pelo apoio e ajuda na parte burocrática e logística.

Aos colegas e ex-colegas do ProjEta, Daniela Rodrigues, Diego Campos, Diego Chagas, Dragan Latinovic, Felipe Alves, Gracielle Chagas, Gustavo Sueiro, João Figueiredo, Jorge Gomes, Letícia, Lucci Paolocchi, Marcele Dourado, Marilei Foss e Nicole Resende, pelo apoio. Em especial, ao Adan Silva, pela grande ajuda computacional, ensinamentos técnicos, companheirismo, incentivo, dedicação, paciência, amizade e por partilhar de bons momentos de descontração; e a André Lyra, pela grande colaboração, ajuda e sugestões.

Ao grupo do Modelo INLAND, especialmente ao Raphael Pousa e Juninho pela ajuda e auxílio técnico.

Ao pesquisador Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela grande contribuição na disponibilização dos parâmetros fisiológicos do cafeeiro.

Ao pesquisador Dr. Samuel Cordeiro Vitor Martins Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelos esclarecimentos e transformação do parâmetro de velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco.

Ao Engenheiro Agrônomo Renan Barros, pelas contribuições em questões técnicas do cafeeiro em campo.

À “Turmis 2012” (PG-CST), parafraseando nosso querido amigo Gilney, uma turma sem igual. Aos amigos Alex Ovando, Aline Castro, Carla Roig (Carlinha), Fernando Santos (Fê), Gilney Bezerra (Gilneys), Karine Rocha, Lucía Chipponelli, Mabel Costa (Mabelita), Maria Francisca Velloso (Chics), Michelle Furtado, Minella Martins (Mi) e Sandro Klippel, por compartilhar os momentos de luta e conquista.

As minhas “irmã migas” e ex “irmã migas” de casa Dinelsa Machaieie (Dr. Di), Nathália Nascimento (Nath), Fabrícia Almeida (Fá) e Ana Rorato (Anis), pelas palavras de carinho e incentivo nos momentos difíceis, e por compartilhar de bons momentos de alegria e amizade.

Aos meus amigos de longa data, Emília Oliveira, Fernando Mendonça, Luana Azevedo, Polyanna Bispo, Regina Nakamura, Sarita Severien, Sidney Zu e Tatiana Rabello, por todo o carinho, parceria, apoio e incentivo.

E por fim, um agradecimento mais que especial a minha família. A meus pais Joás e Edileuza, por me tornar quem eu sou. A minhas irmãs, Shirley e Michelle, pelas palavras de incentivo, motivação e esperança, as quais me fizeram tomar fôlego para seguir a jornada. À minha sobrinha, Giordana Valentina, uma pessoinha incrível que perpassa a idade quem tem e já dá lições de vida. A meus cunhados Ademir e Carlo, pelo grande incentivo. À Thamires Martins, pelo ombro nos momentos difíceis, pelo sorriso nos momentos alegres e por me trazer à superfície quando tudo parecia escuridão. Aos filhos peludinhos Pina Marie e Woody Nelson, pelo companheirismo até altas horas da noite. Enfim, a todos vocês obrigada por serem tão maravilhosos assim e me incrustar a cada dia mais o pensamento de que “juntos somos mais fortes”.

RESUMO

O Brasil lidera o mercado de café com fatias da ordem de 30 a 40% de toda a produção mundial. A intolerância do cafeeiro arábica – espécie mais cultivada no Brasil e no mundo - a grande variação da temperatura do ar é preocupante quando se leva em conta as projeções climáticas divulgadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC em inglês). Em vista disso, o objetivo desta tese consistiu na avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro arábica na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais, considerada principal polo produtor do grão no país. Para tal, foram usadas projeções de dois cenários de mudanças climáticas: RCP4.5 e RCP8.5, regionalizados em altíssima resolução horizontal (5 km) pelo Modelo Climático Eta a partir das condições de contorno lateral do modelo HadGEM2-ES. As projeções climáticas foram usadas para estimar a produtividade cafeeira futura sob duas abordagens metodológicas: uma usual, através do zoneamento agroclimático e a partir do Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND), através da implementação do cafeeiro no mesmo. O INLAND integra uma grande parte dos processos da biosfera, incluindo aspectos físicos, fisiológicos e fenológicos do dossel, além de simular os efeitos diretos do incremento do CO₂ atmosférico na planta. O modelo foi, portanto, adaptado, calibrado e validado para reproduzir as tendências de produtividade da cultura na região de estudo. O INLAND-*coffee*, assim nomeado a partir dos desenvolvimentos desta tese, surge para preencher a lacuna que existe entre modelos puramente empíricos e os modelos mais complexos baseado em mecanismos biofísicos. As projeções indicaram aumento médio da produtividade na mesorregião de estudo, podendo chegar a 91% no final do século XXI, no caso do cenário RCP4.5. No cenário RCP8.5, níveis mais excessivos de CO₂, projetados para o final do século, aliados a aumentos da temperatura do ar de cerca de 5 a 6°C e aumento da restrição hídrica, tendem a suprimir o efeito fertilizante do gás carbônico. Apesar da tendência média extremamente positiva, a mesorregião poderá sofrer com grande variabilidade interanual dos rendimentos, intercalando anos de supersafra com safras diminutas. Especialmente, os resultados mostraram migração das áreas como maior potencial produtivo para as microrregiões de altitudes mais elevadas, a saber: Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço e Andrelândia, agrupadas nesta tese como parte leste da mesorregião. Todavia, nas microrregiões da parte central e oeste da mesorregião, tais como, Alfenas, Varginha, São Sebastião do Paraíso e Passos, foram notadas quedas acentuadas da produtividade ao longo de todo o século XXI. As reduções foram da ordem 17 a 60% em 2011-2040 e 2041-2070, podendo chegar a 71% em 2071-2100. Considerando as características genéticas e fisiológicas atuais das cultivares de café arábica, é necessário propor medidas de adaptação que levem em consideração a elevação da temperatura de no mínimo 4°C.

Palavras-chave: Cafeeiro arábica. Produtividade. Mudanças climáticas.

CLIMATE CHANGE IMPACT ON COFFEE YIELD IN SOUTHEAST BRAZIL

- A MODELING STUDY

ABSTRACT

Brazil leads market slices of 30 to 40% of all world coffee production. The intolerance of Arabica coffee - the most cultivated species in Brazil and in the world - to large variations of air temperature is very disturbing when considering the climate projections released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Therefore, the objective of this thesis was the evaluation of climate change impacts on Arabica coffee yield in the South/Southwest mesoregion of Minas Gerais State, the largest producer of the grain in Brazil. For such purpose, projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (IPCC AR5) downscaled by the Eta Regional Climate Model at 5-km resolution from HadGEM2-ES model's lateral boundary conditions were used. The climate projections were used to estimate future coffee yield under two methodological approaches: through the usual agroclimatic zoning and through the implementation of coffee in the Integrated Model of Land Surface Processes (INLAND). INLAND integrates most of the land surface processes, including physical, physiological and phenological aspects of the canopy, also simulating the direct effects of atmospheric carbon dioxide enrichment in the plant. The model was adapted, calibrated and validated to reproduce Arabica coffee yield tendencies in the study region. The INLAND-coffee, so called along the thesis development, emerges to fill the gap that exists between purely empirical models and the more complex models based on biophysical mechanisms. Projections indicated an average crop yield increase in the mesoregion of study, reaching 91% at the end of the 21st century, in the case of the RCP4.5 scenario. In the RCP8.5 scenario, high carbon dioxide levels, projected towards the end of the century, combined with increases of about 5 to 6°C in air temperature and increased water restriction, tend to suppress the fertilizing effect of carbon dioxide. In spite of the extremely positive average tendency, the mesoregion may suffer with great interannual variability of yields, interspersing years of super crop with small crop. Spatially, the results show migration of the areas of greater potential crop yield to the higher altitudes microregions, namely: Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço and Andrelândia, grouped as an eastern part of the mesoregion. However, in the microregions of the central and western parts of the mesoregion formed by Alfenas, Varginha, São Sebastião do Paraíso and Passos, regardless of the RCP scenario, drastic crop yield falls throughout the 21st century were noticed. The reductions are from the order of 17 to 60% in 2011-2040 and 2041-2070, reaching 71% in 2071-2100. Considering the current genetic and physiological characteristics of Arabica coffee cultivars, it is necessary to propose adaptation measures that take into account the elevation of the temperature of at least 4 °C.

Keywords: Arabica coffee. Crop yield. Climate change.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Produção mundial de café para as safras de 1999 a 2016.....	2
Figura 2.1 – Área de estudo, com destaque para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) a) e as 10 microrregiões contidas na mesma b).	7
Figura 3.1 – Caminhos de concentração do CO ₂ atmosférico nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (IPCC, 2014).	12
Figura 4.1 – Esquema do método proposto por Luppi et al. (2014) contendo as etapas necessárias para realização do zoneamento agroclimático.....	20
Figura 4.2 – Produtividade média do cafeeiro (kg/ha), em grão, dos (a) municípios brasileiros, para o período de 1990 a 2015, com destaque para (b) o estado de Minas Gerais.	22
Figura 4.3 - Localização dos dados meteorológicos selecionados para a validação do Modelo Eta na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).....	23
Figura 4.4 - Ciclo anual da a) evapotranspiração potencial (mm), b) precipitação (mm) e c) temperatura do ar (°C) para mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). O eixo da direita nas figuras se refere aos erros (MAE, BIAS e RMSE) do Modelo Eta-HadGEM 5 km.....	26
Figura 4.5 - Média anual da temperatura a 2m (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km para o período baseline e os timeslices futuros, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.	29
Figura 4.6 - Média anual da deficiência hídrica (mm) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km para o período baseline e os timeslices futuros, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.	30
Figura 4.7 – Zoneamento agroclimático para o cultivo do cafeeiro arábica no sudeste do Brasil, simulado pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km. Período baseline e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5.....	33
Figura 4.8 - Aptidão do cafeeiro arábica para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km. Período baseline e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5.....	34
Figure 4.9 - Produtividade atingível do cafeeiro arábica (kg/ha) na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período baseline e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5	35
Figura 5.1 - Esquema do modelo INLAND. As setas indicam os fluxos de informações entre os módulos.....	48

Figura 5.2 – Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil, com destaque do subperíodo de floração-maturação considerado na implementação da cultura no Modelo INLAND.....	54
Figura 5.3 – Área de atuação do modelo INLAND, com destaque para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).	59
Figura 5.4 – Mapa de propriedade do solo usado pelo modelo INLAND: porcentagem de argila na primeira camada de solo. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km.....	62
Figura 5.5 – Mapas topográficos (m) usados pelo Modelo INLAND. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km	63
Figura 5.6 - Mapas de tipos de uso e cobertura da terra usados para inicialização do Modelo INLAND. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km.	64
Figura 5.7 - Produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) para a mesorregião do Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e as microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas. Dados observados e simulados pelo Modelo INLAND-coffee.....	67
Figura 5.8 - Produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) simulada pelo Modelo INLAND-coffee para mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Média das simulações realizadas com CO ₂ atmosférico fixo e considerando os incrementos anuais projetados pelo IPCC para cada cenário. Período baseline e cenários RCP4.5 e RCP8.5.	70
Figura 5.9 – Evolução temporal da produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) desde meados do século XX até o final do século XXI simulada pelo Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). As simulações foram realizadas com CO ₂ atmosférico fixo e considerando os incrementos anuais projetados pelo IPCC para os cenários RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b).....	72
Figura 5.10 – Média anual da temperatura a 2 m (1ª coluna), em °C, e a deficiência hídrica (2ª coluna), em mm, simuladas pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km, e a produtividade média do cafeeiro arábica (3ª coluna), em kg/ha, estimada pelo Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período baseline e os timeslices futuros, sob o cenário RCP 4.5.	76
Figura 5.11 – Média anual da temperatura a 2 m (1ª coluna), em °C, e a deficiência hídrica (2ª coluna), em mm, simuladas pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km, e a produtividade média do cafeeiro arábica (3ª coluna), em kg/ha, estimada pelo	

Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período baseline e os timeslices futuros, sob o cenário RCP 8.5. ... 77

- Figura 5.12– Porcentagem das mudanças da produtividade do cafeeiro projetadas ao longo do século XXI na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e nas microrregiões nela presente. Projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 geradas pelo Modelo INLAND-coffee. Em destaque no lado superior esquerdo o mapa de topografia (m) da SSMG, na resolução horizontal lida pelo modelo INLAND..... 78
- Figura B.1 – Média anual da deficiência hídrica (mm) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 107
- Figura B.2 – Média anual da temperatura a 2 m (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 108
- Figura B.3 – Média anual da temperatura máxima do ar (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 109
- Figura B.4 – Média anual da temperatura mínima do ar (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 110
- Figura B.5 – Média anual da precipitação (mm/dia) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 111
- Figura B.6 – Média anual da umidade específica (g/kg) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 112
- Figura B.7 – Média anual da velocidade do vento a 10 m (m/s) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 113
- Figura B.8 – Média anual da cobertura de nuvem (%) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período baseline e os campos da diferença entre os timeslices futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período baseline. 114

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 4.1 - Faixas de aptidão com base na temperatura do ar e deficiência hídrica para o café arábica.....	18
Tabela 4.2 – Porcentagem de aptidão para o zoneamento agroclimático do cultivo do cafeeiro arábica. Temp.: Temperatura do ar. D.H.: Déficit Hídrico, P.A.: Porcentagem de Aptidão e Z.A.: Zoneamento Agroclimático.....	19
Tabela 4.3 – Erro médio (BIAS), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação (r) da evapotranspiração potencial (ET _o), precipitação (Prec) e temperatura (Temp) entre as simulações do Modelo Eta-HadGEM 5 km e as observações para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).	27
Tabela 4.4 - Produtividade Atingível do cafeeiro arábica (ProdAt.), em kg/ha, porcentagem de mudança (% mud.) e tendência (Tend.) para as microrregiões da mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), com suas respectivas altitudes médias (Alt.) (m). Período baseline e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP 8.5, divididos em timeslices de 30 anos. ↑ representa tendência positiva, ou seja, aumento da produtividade em relação ao período baseline e ↓ representa tendência negativa (redução).....	37
Tabela 5.1 - Descrição de alguns parâmetros usados na implementação do cafeeiro arábica no modelo INLAND.	58
Tabela 5.2 – Produtividade média do cafeeiro arábica (kg/ha) observada (Obs.) e simulada pelo Modelo INLAND-coffee, para o período de 1991 a 2001, e os erros médios (BIAS), médios absolutos (MAE), raiz dos erros quadráticos médios (RMSE) e os coeficientes de correlação (r) entre as simulações e as observações para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e as microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas.	68
Tabela 5.3 - Produtividade do cafeeiro arábica (Prod.), em kg/ha, porcentagem de mudança (% mud.) e tendência (Tend.) para as microrregiões da mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), com suas respectivas altitudes médias (Alt.) (m). Período baseline e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP 8.5, divididos em timeslices de 30 anos. ↑ representa tendência positiva, ou seja, aumento da produtividade em relação ao período baseline e ↓ representa tendência negativa (redução).....	79
Tabela A.1 – Arquivos modificados no Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND) para implementação do cafeeiro arábica e para realizar rodadas do modelo em alta resolução.	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3-PG	- <i>Physiological Principles in Predicting Growth</i>
ANA	- Agência Nacional de Águas
AR4	- <i>Fourth Assessment Report - IPCC</i>
AR5	- <i>Fifth Assessment Report - IPCC</i>
BESM	- <i>Brazilian Earth System Model</i>
BHC	- Balanço Hídrico Climatológico
CCST	- Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CMIP5	- Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CMSAF	- <i>Satellite Application Facility on Climate Monitoring</i>
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
EP	- Evapotranspiração Potencial
ER	- Evapotranspiração Real
ESA	- <i>European Space Agency</i>
EVI	- <i>Enhanced Vegetation Index</i>
FACE	- <i>Free Air CO₂ Enrichment</i>
GDD	- Graus-Dia de Desenvolvimento
GEE	- Gases do Efeito Estufa
GrADS	- <i>Grid Analysis and Display System</i>
IAF	- Índice de Área Foliar
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGBP	- <i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>
INLAND	- <i>Integrated Model of Land Surface Process</i>
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	- <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISRIC	- <i>International Soil Reference & Information Centre</i>
MAE	- <i>Mean Absolute Error</i>
MAPA	- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCGs	- Modelos Climáticos Globais
MCTI	- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MODIS	- <i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NetCDF	- <i>Network Common Data Form</i>
NGDC	- <i>National Geophysical Data Center</i>
NOAA	- <i>National Oceanic and Atmosphere Administration</i>
OIC	- Organização Internacional do Café
ONU	- Organização das Nações Unidas
RCP	- <i>Representative Concentration Pathway</i>
RMSE	- <i>Root Mean Squared Error</i>
SEB	- Sudeste Brasileiro
SIDRA	- Sistema IBGE de Recuperação Automática
SLA	- <i>Specific Leaf Area</i>
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>

SSMG - Sul-Sudoeste de Minas Gerais
TCC - *Tropical Commodity Coalition*
TFP - Tipos Funcionais de Plantas
UFPA - Universidade Federal de Lavras
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFV - Universidade Federal de Viçosa
ZA - Zoneamento Agroclimático

LISTA DE SÍMBOLOS

η	- Coordenada vertical eta
$[O_2]$	- Concentração de oxigênio atmosférico ($0,209 \text{ mol mol}^{-1}$)
Δ	- Declividade da curva de pressão de vapor em relação a temperatura ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)
A_g	- Taxa de fotossíntese bruta ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
$a_{i,j}$	- Fração de NPP anual alocado em cada reservatório
A_n	- Taxa assimilação líquida de CO_2
AZ_{ij}	- Índice de zoneamento agroclimático (%)
b	- Intercepto da relação linear
C_i	- Concentração intercelular de CO_2
c_s	- Concentração de CO_2 na camada limite foliar
e_a	- Pressão atual de vapor (kPa)
e_s	- Pressão de saturação de vapor (kPa)
ET_o	- Evapotranspiração potencial (mm)
G	- Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
GPP	- Produtividade primária bruta
g_s	- Condutância estomática
h_a	- Umidade relativa do ar
$hybgdd$	- Total máximo de GGD necessário para maturidade fisiológica ocorrer
$idxbiecfe$	- Fator de bienalidade para a cultura do café
$iyrObiecfe$	- Rastreador para aplicar bienalidade da cultura
J_c	- Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela RuBisCO
J_e	- Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz
J_s	- Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela alta concentração intercelular de CO_2 e elevada irradiância
K_c	- Coeficientes de Michaelis-Menten para CO_2
K_o	- Coeficientes de Michaelis-Menten para O_2
m_o	- Coeficiente relacionado à condutância estomática
$mxmat$	- Número máximos de dias permitidos após o plantio e antes que a maturidade fisiológica seja atingida
N	- Nota aptidão climática
NPP	- Produtividade primária líquida
NT	- Número total das simulações
PA_{CC}	- Porcentagem de Aptidão para cada Condição Climática (CC)
PA_{DH}	- Aptidão por deficiência hídrica
PA_{Temp}	- Aptidão por temperatura do ar

pcd	- Dia de calendário de plantio
pcm	- Mês de calendário de plantio
$pmin_{temp}$	- Temperatura mínima do ar
P_{ref}	- Pressão de referência em relação ao nível do mar
P_{sfc}	- Pressão à superfície
P_T	- Pressão no topo do modelo (50 hPa)
$ptemp$	- Médias diárias de 10 dias da temperatura média do ar
Q_p	- Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
r	- Coeficiente de correlação de Pearson
R_d	- Respiração de manutenção
R_n	- Saldo de radiação diário ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)
T	- Taxa de utilização da triose fosfato
T_{Base}	- Temperatura base
$\tau_{i,\phi}$	- Tempo de residência do carbono em cada reservatório
T_m	- Temperatura média do ar ($^{\circ}C$)
$T_{Média}$	- Temperatura média diária
U_2	- Velocidade do vento a 2 metros ($m\ s^{-1}$)
V_m	- Capacidade máxima da enzima Rubisco
V_{max}	- Capacidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco a $15^{\circ}C$ - parâmetro de entrada
V_o	- Variável observada
V_s	- Variável simulada
Y_{ij}	- Produtividade atingível (kg/ha) no ponto de grade do modelo
$Y_{max,j}$	- Máxima produtividade
Z_{sfc}	- Elevação da fronteira inferior do modelo
α_3	- Eficiência quântica intrínseca no sequestro de CO_2
γ	- Coeficiente psicrométrico ($kPa^{\circ}C^{-1}$)
Γ^*	- Ponto de compensação para a assimilação bruta de CO_2 ($mol.mol^{-1}$)
ζ	- Custo de respiração da atividade Rubisco
θ	- Constante empírica que rege a transição entre as três taxas potenciais de fotossíntese
τ	- Relação entre os parâmetros cinéticos que descrevem o particionamento da atividade da enzima para a função de carboxilase e oxigenase
$\omega(S)$	- Função de estresse devido à umidade do solo
$\omega(T)$	- Função de estresse devido à temperatura

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO 1
1.1.	Objetivos 4
1.2.	Estrutura da tese 5
2	ÁREA DE ESTUDO 7
3	MODELO CLIMÁTICO ETA..... 9
3.1.	Cenários RCP 11
3.2.	Modelo HadGEM2-ES 13
4	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO ARÁBICA: ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO..... 15
4.1.	Introdução..... 15
4.2.	Dados e Metodologia 17
4.2.1.	Zoneamento agroclimático do cafeeiro arábica 17
4.2.2.	Produtividade atingível..... 22
4.2.3.	Validação das simulações do Modelo Regional Eta 23
4.3.	Resultados 25
4.3.1.	Avaliação das simulações do período baseline 25
4.3.2.	Projeções climáticas 27
4.3.3.	Aptidão do cafeeiro em cenários climáticos futuros 31
4.3.4.	Impacto das mudanças climáticas na mesorregião sul-sudoeste de Minas Gerais 34
4.4.	Conclusões do capítulo..... 38
5	IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO ARÁBICA: MODELO INLAND 41
5.1.	Introdução..... 41
5.2.	Dados e metodologia..... 47
5.2.1.	Descrição do Modelo de Superfície INLAND 47
5.2.1.1.	Fisiologia do dossel 49
5.2.1.2.	Fenologia 51
5.2.1.3.	Balço de carbono..... 52
5.2.1.4.	Estratégia de inserção do cafeeiro no modelo INLAND 53
5.2.2.	Configuração do INLAND-coffee e dados de entrada..... 59
5.3.	Resultados 65
5.3.1.	Avaliação do INLAND-coffee 65
5.3.2.	Respostas da produtividade ao incremento de CO ₂ atmosférico 69
5.3.3.	Projeções da produtividade em cenários de mudanças climáticas 73
5.4.	Conclusões do capítulo..... 80

6	SÍNTESE E CONCLUSÕES GERAIS.....	83
	Sugestões de trabalhos futuros.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A: Arquivos modificados no Modelo INLAND	105
	APÊNDICE B: Projeções espaciais das mudanças médias (2011-2100)	107
	B.1 Deficiência hídrica.....	107
	B.2 Temperatura média do ar	108
	B.3 Temperatura máxima do ar	109
	B.4 Temperatura mínima do ar	110
	B.5 Precipitação.....	111
	B.6 Umidade específica	112
	B.7 Velocidade do vento a 10 m	113
	B.8 Cobertura de nuvem.....	114

1 INTRODUÇÃO

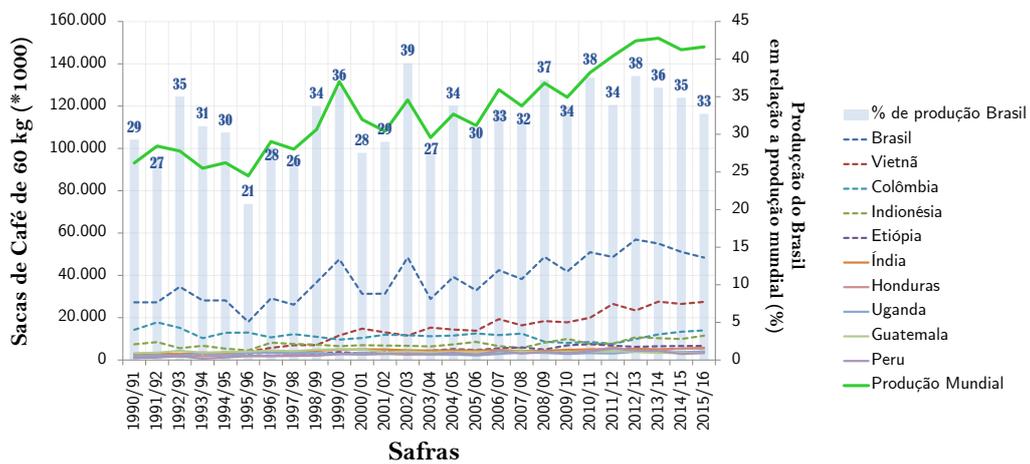
O agronegócio do café envolve cerca de meio bilhão de pessoas (DAMATTA et al., 2007), aproximadamente 8% da população mundial, em uma cadeia produtiva que vai do campo à bebida. Trata-se de um dos mais valiosos produtos primários comercializados no mundo e em alguns anos chegou a superar o valor do petróleo (OIC, 2015). Estima-se que a produção e a comercialização do grão movimentam, anualmente, mais de 90 bilhões de dólares (OIC, 2015; DAMATTA et al., 2007; KOBAYASHI, 2007).

Há mais de um século e meio o Brasil lidera o ranking de maior produtor e exportador (BALIZA et al., 2013), sendo designado o grão como propulsor do desenvolvimento econômico e gerador de riquezas no país. Sua importância pode ser visualizada tanto no volume produzido quanto na economia e na capacidade de geração de empregos. Nas últimas duas décadas, a representação brasileira foi, em média, um terço de toda produção mundial, com aumento nos últimos anos, o que sugere que o mercado para os cafés no Brasil e no mundo tem se expandido (Figura 1.1). De acordo com os dados da safra de 2015/2016, a produção nacional atingiu o montante de 48 milhões de sacas de café beneficiado (Figura 1.1), com uma área total cultivada da ordem de 2,2 milhões de hectares (CONAB, 2016; OIC, 2017). Estima-se que para cada hectare plantado são gerados de 2 a 3 empregos diretos e pelo menos 4 indiretos (CAFEICULTURA, 2006). A cadeia produtiva da cultura gera, em média, mais de oito milhões de empregos, proporcionando renda, acesso à saúde e à educação para os trabalhadores e suas famílias, apresentando como um fator fixador da mão de obra no meio rural (MAPA, 2013). A agricultura familiar representa um papel importante na cafeicultura, contribuindo por 37% da produção brasileira. No mundo inteiro, a produção do café oriunda da prática familiar representa a maioria esmagadora da cafeicultura, sendo da ordem de 25 milhões de produtores disseminados em mais de 50 países (TCC, 2012 apud FREDERICO, 2014)

Além da boa produtividade, os produtores têm que assegurar também uma boa qualidade do grão, de forma que continue sendo valorizado e comercializado no

mercado mundial. O café para ter uma boa produtividade e qualidade necessita ter condições climáticas favoráveis. Faixas ótimas de temperaturas médias anuais do ar, no caso da espécie *Coffea arabica* L. - espécie mais comercializada no Brasil e no mundo - situam-se entre 18°C e 22°C. A ocorrência frequente de temperaturas máximas acima de 28°C diminui a produção de folha e a atividade fotossintética e, a partir de 34°C causa o abortamento de flores e, conseqüentemente, perda de produtividade (CAMARGO, 1985; DRINNAN; MENZEL, 1995; PINTO et al., 2001; SEDIYAMA et al., 2001).

Figura 1.1 – Produção mundial de café para as safras de 1999 a 2016.



Produção mundial do café para os dez principais países produtores, mostrados no gráfico em mil sacas de café beneficiado. Dados disponibilizados pela Organização Internacional do Café (OIC) através do catálogo de dados históricos em: http://www.ico.org/pt/new_historical_p.asp?section=Estat%EDstica

Fonte: Produção da autora.

A intolerância do cafeeiro às grandes variações da temperatura do ar pode ser preocupante quando são consideradas as projeções climáticas de aumento das médias globais referenciadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel On Climate Changes - IPCC*). Além disso, estima-se que mais de 80% das propriedades rurais que produzem café no Brasil são estabelecimentos familiares (CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ, 2014), o que torna, pelo exposto, devido à baixa capacidade de adaptação dos agricultores familiares,

esta população mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas. Outro agravante é que o café contribui para a economia de muitos países em desenvolvimento, onde as exportações do grão podem chegar a 70% das divisas (SINDICAFÉ-MG, 2004). De acordo com o último relatório do IPCC, lançado em 2014, a temperatura média do planeta poderá aumentar em quase 5°C até o final do século XXI, no caso do cenário de alta concentração de CO₂ (IPCC, 2014). No Sudeste do Brasil (SEB) o aumento poderá passar, neste cenário, de 4 a 9°C nos meses do verão e inverno austral (LYRA et al., 2017; CHOU et al., 2014a). Admitindo tal aumento, regiões atualmente aptas ao desenvolvimento vegetal poderiam se tornar desfavoráveis no clima futuro e é pressuposto que quanto maior for o aumento, menor poderá ser a aptidão climática da região.

Nos últimos anos, muitos esforços têm sido realizados para avaliar os potenciais impactos na cafeicultura nacional e mundial. De fato, muitos estudos sugerem que as alterações climáticas projetadas ocasionarão perdas drásticas das áreas atualmente adequadas no Brasil (ASSAD et al., 2004; ZULLO JÚNIOR et al., 2006; PINTO et al., 2008; ANDRADE et al., 2012; BRAGANÇA et al., 2014; BUNN, 2015; BUNN et al., 2015; BRAGANÇA et al., 2016) e no Vietnã (BUNN, 2015; BUNN et al., 2015; OVALLE-RIVERA et al., 2015), com extinção de populações selvagens de cafeeiro arábica na Etiópia (DAVIS et al., 2012) e grande vulnerabilidade agrícola, social e econômica em El Salvador, Guatemala, México e Nicarágua (BACA et al., 2014). Todavia, a maior parte destes estudos não considerou: - modelos climáticos regionais, em alta resolução horizontal, com intuito de fornecer um melhor detalhamento microclimático dos impactos das mudanças climáticas nas áreas atualmente adequadas e - a influência interativa entre o aumento da temperatura do ar e os aumentos também previstos do CO₂ atmosférico, que no caso do cafeeiro tem respondido, através de trabalhos experimentais, com ajuste metabólico e aumento da taxa fotossintética (RAMALHO et al., 2013; GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016; RODRIGUES et al., 2016); Além disso, não avaliaram como a produtividade do cafeeiro responderá aos cenários climáticos com detalhamentos meso/microrregionais.

1.1. Objetivos

Diante do exposto, o objetivo desta tese consiste da avaliação dos impactos dos cenários de mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro arábica em áreas do SEB, com intuito de auxiliar estudos de planejamento, adaptação e mitigação. Para tal, foram considerados dois cenários de mudanças climáticas: RCP4.5 e RCP8.5, regionalizados pelo Modelo Eta – em 5 km de resolução horizontal - a partir das condições de contorno lateral do modelo global HadGEM2-ES. A produtividade foi estimada a partir de duas abordagens metodológicas. A primeira estima a produtividade atingível do cafeeiro através do zoneamento agroclimático, uma ferramenta usual, mas até então não gerada a partir de modelos climáticos em altíssima resolução espacial. A segunda estima a produtividade real do cafeeiro a partir dos mecanismos da planta através do Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND). Uma abordagem extremamente inovadora, pois possibilitou simulações multidecenais da produtividade, com a influência mútua entre as condições climáticas futuras e as projeções também dos incrementos anuais do CO₂ atmosférico. Para atingir tal objetivo, o Modelo INLAND foi adaptado, calibrado e validado para reproduzir as tendências da produtividade do cafeeiro arábica na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), região com grande volume de produção (CONAB, 2017). O *INLAND-coffee*, assim nomeado a partir dos desenvolvimentos desta tese, surge para suprir a lacuna que existe entre modelos puramente empíricos e os modelos mais complexos baseado em mecanismos físicos, fisiológicos e fenológicos da planta. A partir destas duas abordagens metodológicas foi possível responder os seguintes questionamentos:

As reduções das áreas atualmente aptas ao desenvolvimento e crescimento do cafeeiro, considerando as características genéticas e fisiológicas atuais das cultivares de café arábica, são realmente catastróficas como previamente projetadas?

As simulações da produtividade em cenários climáticos futuros, através do *INLAND-coffee*, correspondem ao comportamento experimental do cafeeiro enriquecido com CO₂ atmosférico?

O incremento do CO₂ atmosférico pode realmente atenuar os efeitos nocivos do aumento da temperatura do ar no cafeeiro arábica?

Os resultados dos impactos das mudanças climáticas através da metodologia usual (zoneamento agroclimático) e da modelagem do cafeeiro (INLAND-*coffee*) mostram a mesma tendência da produtividade da cultura ao longo do século XXI?

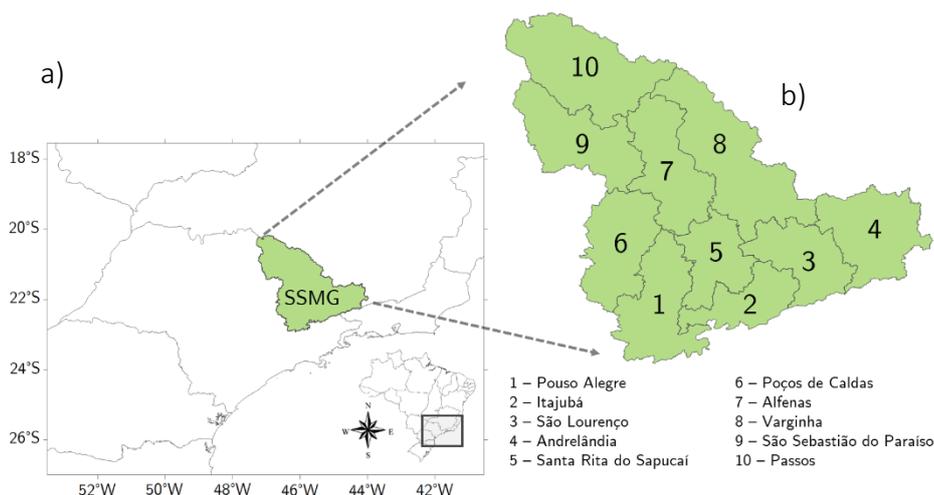
1.2. Estrutura da tese

Esta tese está organizada da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta uma breve descrição da área de estudo e a importância da mesma na cafeicultura brasileira. No Capítulo 3 expõem-se os cenários climáticos selecionados e a descrição do Modelo atmosférico regional Eta usados na realização do zoneamento agroclimático e como forçantes atmosféricas no Modelo INLAND. No Capítulo 4 são mostrados os resultados das avaliações dos impactos das mudanças climáticas na produtividade atingível do cafeeiro gerada pelo zoneamento agroclimático, assim como uma breve introdução a respeito do assunto e os dados e metodologia necessários. No Capítulo 5 encontram-se os resultados obtidos das avaliações dos impactos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro gerada através do modelo INLAND. Neste capítulo, além de uma breve introdução sobre a modelagem cafeeira são descritas também a estratégia utilizada para a implementação da cultura e a descrição dos novos dados de contorno de superfície usados para executar o modelo INLAND em alta resolução horizontal. No Capítulo 6 expõem-se uma síntese da contribuição dos resultados e as conclusões obtidas ao final desta tese, contrapondo as duas metodologias usadas.

2 ÁREA DE ESTUDO

As espécies de café mais comercializadas no Brasil e no mundo são a arábica e a conilon, sendo a primeira responsável por mais de 80% de toda a produção brasileira (CONAB, 2017). Atualmente, os principais estados produtores do grão são Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás, Mato Grosso e Amazonas, que contribuem por cerca de 100% da produção nacional. Minas Gerais lidera o ranking, com mais de 50% de toda a produção, sendo o sul do estado o principal polo produtor de café arábica no Brasil (CONAB, 2017). Portanto, pelo exposto, as avaliações que constam nesta tese foram direcionadas para áreas do SEB (Figura 2.1a) com foco principal na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), de acordo com os limites propostos por IBGE (2002) (Figura 2.1b). As avaliações foram detalhadas também em nível das microrregiões contidas na mesorregião SSMG. Esta mesorregião é formada pela união de 146 municípios, agrupadas nas microrregiões de Alfenas, Andrelândia, Itajubá, Passos, Poços de Caldas, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Varginha (Figura 2.1b), totalizando uma área de 49.523,893 km² (IBGE, 2001).

Figura 2.1 – Área de estudo, com destaque para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) a) e as 10 microrregiões contidas na mesma b).



Fonte: Produção da autora com base no domínio do Modelo Regional Eta em 5km a) e nos dados cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2002) b).

3 MODELO CLIMÁTICO ETA

A seguir é apresentada uma breve descrição do Modelo Eta, assim como os cenários climáticos selecionados.

O modelo Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994). A partir de 1996, tornou-se operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) com a finalidade de complementar a previsão numérica de tempo realizada com o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC (CHOU, 1996). O Eta é um modelo numérico complexo na representação dos processos físicos e dinâmicos da atmosfera e inclui explicitamente os processos de mesoescala. É da categoria de modelos chamados de regionais ou de área limitada e que, portanto, necessitam de modelos globais para lhe fornecer informações da atmosfera nos contornos laterais.

Uma particularidade do modelo e que dá nome ao próprio constitui-se da utilização da coordenada vertical eta (η), considerada mais adequada para simulações em regiões de topografia complexa, favorecendo assim uma melhor representação de microclimas como observado nas regiões cafeeiras do SEB. Uma melhor adequação da topografia através do uso desta coordenada é devido a mesma ser representada na forma de degraus discretos, contribuindo para a redução dos erros nos cálculos obtidos de derivadas horizontais, tais como aqueles relacionados com a força do gradiente horizontal de pressão (MESINGER, 1984). A coordenada η é definida pela seguinte expressão:

$$\eta = \left(\frac{P - P_T}{P_{sfc} - P_T} \right) \left[\frac{P_{ref}(z_{sfc}) - P_T}{P_{ref}(0) - P_T} \right] \quad (3.1)$$

em que, P_T é a pressão no topo do modelo (50 hPa), P_{sfc} e Z_{sfc} são a pressão e a elevação da fronteira inferior do modelo, respectivamente, e P_{ref} é a pressão de referência em relação ao nível do mar. O primeiro termo do lado direito da equação é a definição padrão da coordenada sigma e o segundo termo executa a conversão de coordenada sigma em coordenada eta.

A dinâmica do modelo é determinada em volumes finitos (JANJIC 1984, MESINGER et al., 2012). As convecções profundas e rasas são parametrizadas pelo esquema de Betts-Miller (BETTS; MILLER, 1986), modificado por Janjic (1994). A microfísica das nuvens segue o esquema de Zhao (ZHAO et al., 1997). Os processos da superfície são representados pelo esquema NOAH (EK et al., 2003) com ciclo anual de vegetação verde. A vegetação distingue 13 tipos e para o solo são considerados 9 tipos. Os fluxos radiativos são tratados pelo esquema de Lacis-Hansen (LACIS; HANSEN, 1974), para ondas curtas, e o esquema de Fels-Schwarzkopf (FELS; SCHWARZKOPF, 1975) para ondas longas. A camada superficial baseia-se na teoria de similaridade de Monin-Obukhov e nas funções de estabilidade de Paulson (PAULSON, 1970). O modelo resolve a mistura turbulenta na atmosfera através do esquema de Mellor-Yamada (MELLOR; YAMADA, 1982) a um nível de fechamento de 2.5. As recentes atualizações do modelo podem ser encontradas em Mesinger et al. (2012), Chou et al. (2014a), e Lyra et al. (2017).

Adaptações no modelo Eta para gerar cenários de mudanças climáticas sobre o Brasil foram realizadas, inicialmente, por Pesquero et al. (2009), Chou et al. (2012) e Marengo et al. (2012). Recentemente, Chou et al. (2014a, 2014b) realizaram simulações multidecenais, na grade regular horizontal de 20 km x 20 km, a partir do aninhamento do Eta em três modelos climáticos globais do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*). As simulações apresentaram boa destreza na representação do clima presente da América do Sul e, portanto, as projeções do clima futuro foram utilizadas para apoiar a Terceira Comunicação Brasileira da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI 2016). Lyra et al. (2017) realizaram um segundo aninhamento do modelo Eta na grade regular horizontal de 5 km x 5 km sobre o SEB a partir das simulações geradas por Chou et al. (2014a, 2014b). As rodadas em altíssima resolução aprimoraram as simulações do clima presente, especialmente em regiões de topografia complexa, bem como os valores da distribuição de frequência de eventos extremos de precipitação e temperatura na região. Estas simulações, por apresentarem resoluções mais refinadas, são as mais indicadas para uso de estudos de impactos das mudanças climáticas em áreas agrícolas.

Portanto, na realização desta tese, foram utilizadas as simulações do modelo Eta versão não-hidrostática, com resolução horizontal de 5 km, duplamente aninhadas ao modelo HadGEM2-ES (Lyra et al., 2017), denominado a partir daqui como Eta-HadGEM 5 km. O domínio do modelo Eta-HadGEM 5 km abrange parte do SEB e engloba as principais áreas cafeeiras da região, como o SSMG, já apresentado no capítulo anterior (Figura 2.1a). As rodadas do Eta em 5 km foram selecionadas por serem as simulações em mais alta resolução horizontal disponíveis no Brasil, além da expectativa de que o tamanho da grade do modelo contribuísse para a produtividade cafeeira em escalas mais refinadas. Maiores informações do Eta-HadGEM em 5 km podem ser encontradas em Lyra et al. (2017). As simulações do clima futuro (2011 a 2100) são baseadas nos caminhos representativos de concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE) e suas forçantes radiativas no clima, chamados de *Representative Concentration Pathway* (RCP) (MOSS et al. 2010). Foi considerado um cenário de concentração intermediária (RCP4.5) e um de alta concentração (RCP8.5), semelhantes aos cenários anteriores B1 e A1FI (IPCC, 2007), respectivamente. Nesta tese, as mudanças ocorridas nos cenários climáticos futuros foram avaliadas através da comparação com as simulações do período *baseline* (1961-1990), também denominado como clima presente.

Detalhamentos dos cenários de concentração RCP assim como do modelo HadGEM2-ES, usado como condição de contorno lateral no modelo regional Eta, seguem abaixo.

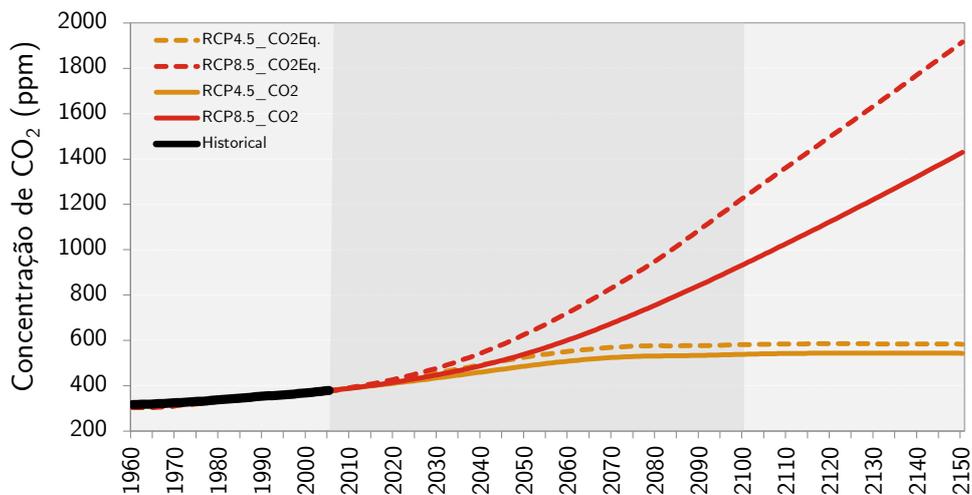
3.1. Cenários RCP

No cenário RCP 4.5 é pressuposto que o sistema terrestre armazenará 4.5 W.m^{-2} adicionais, com concentração do CO_2 equivalente da ordem de 600 ppm, apresentando estabilização após o final do século XXI (Figura 3.1). Este RCP é direcionado para um futuro com redução das emissões relativamente otimista, programas consistentes de reflorestamento, diminuição das áreas de cultivos agrícolas e pastagens devidos os aumentos da produtividade e das mudanças dos

hábitos alimentares, políticas climáticas rigorosas, emissões estáveis de metano e menor intensidade de energia (BJØRNÆS, 2013).

No cenário RCP8.5 é pressuposto um armazenamento de 8.5 W.m^{-2} com concentração de CO_2 equivalente superior a 1000 ppm até o final do século (Figura 3.1). Este RCP implica em um futuro sem mudanças das políticas públicas para redução das emissões, aumento das emissões de CO_2 em 2100 três vezes mais do que as atuais, aumento rápido das emissões de metano, aumento de áreas agrícolas e de pastagens para suprir a demanda devido ao aumento da população mundial, sendo da ordem de 12 bilhões em 2100, baixa taxa de crescimento tecnológico e alta dependência dos combustíveis fósseis (BJØRNÆS, 2013).

Figura 3.1 – Caminhos de concentração do CO_2 atmosférico nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (IPCC, 2014).



As concentrações de CO_2 equivalente compreendem o efeito líquido de todas as forçantes antrópicas, incluindo todos os gases do efeito estufa (CO_2 , C, N_2O , CF_4 , C_2F_6 , HFC32 etc.), aerossóis e ozônio troposférico (MEINSHAUSEN et al., 2011).

Fonte: Produção da autora com base nos dados de Meinshausen et al. (2011).

3.2. Modelo HadGEM2-ES

O modelo HadGEM2-ES é proveniente *do UK Met Office Hadley Centre* e faz parte da coleção de modelos usados no quinto projeto de intercomparação de modelos acoplados (CMIP5). O acrônimo HadGEM2-ES indica a versão 2 de modelos HadGEM com referência as componentes do sistema terrestre, ou seja, *Earth System* em inglês, que correspondem aos ciclos de carbono e a química da troposfera (MARTIN et al., 2011).

A componente atmosférica do modelo tem resolução horizontal de aproximadamente $1.875^\circ \times 1.250^\circ$ em longitude por latitude, com 38 níveis verticais. A componente oceânica usa uma grade de latitude-longitude com resolução zonal constante de 1° e resolução meridional variável, consistindo de 1° entre os polos e 30° de latitude e aumentando suavemente até $1/3^\circ$ no equador, com 40 níveis na vertical (COLLINS et al., 2011). A vegetação terrestre e o carbono são representados pelo modelo de vegetação global dinâmica TRIFFID (*Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics*; COX, 2001), que simula a cobertura e o balanço de carbono de 5 tipos funcionais de plantas: árvore de folha larga (*broadleaf*), conífera (*needleleaf trees*), gramíneas C3, gramíneas C4 e vegetação arbustiva (*shrub*).

A biologia e a química oceânica são representadas pelo modelo diat-HadOCC (PALMER; TOTTERDELL, 2001), que inclui a limitação do crescimento de plâncton por macro e micronutrientes e também simula as emissões de dimetil sulfeto para a atmosfera. O HadGEM2-ES inclui também a química da atmosfera e modelo de aerossol com carbono orgânico e representação de poeira através do esquema UKCA (*United Kingdom Chemistry and Aerosol model*; O'CONNOR et al., 2009; 2013). Detalhamentos do modelo HadGEM2-ES podem ser encontrados em Collins et al. (2011) e Martin et al. (2011).

4 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO ARÁBICA: ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO

4.1. Introdução

Grande parte das oscilações da produtividade do cafeeiro está associada, principalmente, a fatores climáticos, devido a cultura necessitar de condições favoráveis durante todo seu ciclo vegetativo e reprodutivo. Uma região que atenda as exigências climáticas, especialmente em relação a temperatura do ar e a demanda hídrica, é considerada apta ao cultivo do cafeeiro. Neste contexto, a delimitação de regiões com potencial climático e pedológico favoráveis, através do uso de zoneamento agroclimático, é considerada uma ferramenta primordial no planejamento agrícola (MEIRELES et al., 2007).

Alguns estudos realizados através de zoneamentos agroclimáticos evidenciaram impactos diretos das mudanças climáticas nas áreas atualmente aptas ao cultivo do cafeeiro (ASSAD et al., 2004; ZULLO JUNIOR et al., 2006; PINTO et al., 2008; ANDRADE et al., 2012; OVALLE-RIVERA et al., 2015; BUNN et al., 2015; BUNN 2015; BRAGANÇA et al., 2016, RANJITKAR et al., 2016). No Brasil, os primeiros esforços para identificar os possíveis impactos das mudanças climáticas na cafeicultura foram realizados por Pinto et al. (2002), Assad et al. (2004), Zullo Junior et al. (2006) e Pinto et al. (2008). Estes estudos simularam como os cenários poderiam afetar as regiões brasileiras atualmente aptas ao cultivo da espécie arábica. Tomaram como premissa que devido à dimensão territorial do Brasil, as projeções de aumento das temperaturas poderiam contribuir para que algumas regiões climaticamente limítrofes aquelas de cultivo adequado, pudessem se tornar desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (ASSAD et al., 2004). Os resultados encontrados por Pinto et al. (2008) confirmaram as conclusões feitas anteriormente por Pinto et al. (2002), Assad et al. (2004) e Zullo Junior et al. (2006), os quais mostraram que áreas altamente produtoras de café, como os estados de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo, passariam a apresentar alto risco climático se nenhuma medida adaptativa fosse realizada. Os estudos indicaram uma reconfiguração da cafeicultura brasileira, com deslocamento do cultivo mais para região sul do país

em busca de condições climáticas mais favoráveis. Como o café é uma cultura perene, tal deslocamento contribuiria para impactos tanto na região de origem, onde é tradicionalmente cultivada, quanto na região de destino, a qual receberia a nova atividade agrícola (COLTRI, 2012). Mudança do uso da terra ocasionaria transformação local significativa, bem como modificação do uso da infraestrutura, mão de obra, prestação de serviços e transporte, além de consequências para o deslocamento e escoamento da produção (COLTRI, 2012).

De acordo com Pinto et al. (2008), no cenário B2 – - baixa emissão dos GEE, a queda da área de baixo risco climático não seria tão brusca até meados de 2020 (6,75%), porém, a partir de 2050, a queda seria de aproximadamente 18,3% chegando a uma redução de até 27,6% em 2070; já para o cenário A2 – alta emissão dos GEE, a redução da área de baixo risco passaria de 9,48% a 33,0% nos anos de 2020 a 2070, respectivamente. Segundo os autores, os prejuízos financeiros passariam R\$628,5 milhões em 2020 a R\$2,55 bilhões em 2070 para o cenário de baixa emissão, enquanto que no cenário de alta emissão os valores passariam de R\$882 milhões em 2020 a R\$ 3 bilhões em 2070.

Embora estes estudos tenham representado um marco na avaliação dos riscos que a cafeicultura brasileira poderá enfrentar devido a mudança do clima sem considerar práticas de adaptação, a maioria deles considerou um aumento homogêneo da temperatura média do ar na área de estudo ou consideraram projeções de Modelos Climáticos Globais (MCGs). Além disso, não avaliaram como os cenários poderiam impactar na produtividade do cafeeiro. A limitação em considerar o aumento da temperatura média global para qualquer região do mundo, é que a temperatura varia em escala local, sazonal e temporal. O tamanho da grade regular dos MCGs varia de 100 a 200 km, o que tende a suavizar e/ou não capturar características locais, tais como: diferenças topográficas, bacias hidrográficas, linhas costeiras etc. e especialmente o zoneamento agroclimático, que depende de condições microclimáticas.

Técnicas de redução de escala (*downscaling* dinâmico) usando modelos climáticos regionais têm se configurado como importantes ferramentas quando se pretende

avaliar os impactos das mudanças climáticas em escala regional, ou até mesmo local, como por exemplo, em áreas agrícolas. Modelos regionais admitem resoluções horizontais da ordem de dezenas de quilômetros e, conseqüentemente, permitem simulações explícitas dos processos de mesoescala, com melhor representação das características locais, podendo assim fornecer resultados mais refinados. No caso do cafeeiro arábica, localizado no Brasil em áreas de topografia complexa, tal como no SSMG, o uso de modelos regionais pode contribuir para um zoneamento mais preciso e, conseqüentemente, avaliações mais criteriosas dos impactos das mudanças climáticas na cultura.

Portanto, diante do exposto, o objetivo deste capítulo é avaliar os impactos das mudanças climáticas na produtividade atingível do cafeeiro arábica, gerada a partir do zoneamento agroclimático considerando os cenários climáticos projetados pelo IPCC AR5 (IPCC, 2013) em altíssima resolução espacial, regionalizados por Lyra et al. (2017).

4.2. Dados e Metodologia

A estimativa da produtividade do cafeeiro, tanto no clima presente quanto no futuro, foi realizada através do zoneamento agroclimático baseado nas exigências climáticas da cultura e também nas simulações do modelo Eta-HadGEM 5 km. Detalhamentos dos cenários e dos modelos foram apresentados no capítulo 3. São apresentadas a seguir a metodologia usada para realização do zoneamento agroclimático, bem como, a metodologia para a estimativa da produtividade atingível.

4.2.1. Zoneamento agroclimático do cafeeiro arábica

O zoneamento agroclimático da cultura para a região Sudeste foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Luppi et al. (2014), a qual considera as limitações térmicas e hídricas médias anuais do cafeeiro arábica (CAMARGO, 1977; MATIELLO, 1991) e relaciona cada faixa de aptidão à uma nota, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Faixas de aptidão com base na temperatura do ar e deficiência hídrica para o café arábica.

Aptidão	Temperatura	Deficiência hídrica	Nota
Adequada	18,0 – 22,5 °C	< 150 mm	1
Restrita	22,5 – 24,0 °C	150 - 200 mm	2
Inadequada	< 18 °C e > 24 °C	> 200 mm	3

Fonte: Adaptada de Luppi et al. (2014).

Regiões com fatores térmicos ótimos para o crescimento e produção do café são aquelas que apresentam temperaturas médias anuais entre 18°C e 22,5°C (Tabela 4.1). Regiões com temperaturas médias anuais entre 22,5°C e 24°C são consideradas restritas ao cultivo do cafeeiro. Em regiões onde as temperaturas médias anuais excedem 24°C, a maturação dos frutos é antecipada e geralmente ocorre durante a estação chuvosa, dificultando a colheita e a secagem do fruto devido as chuvas frequentes. Esta situação contribui para a deterioração da qualidade do produto devido a fermentações indesejadas da polpa dos frutos resultando em bebida de qualidade inferior (PEREIRA et al., 2008). Deste modo, tais regiões são consideradas inadequadas devido ao excesso de calor. Outrossim, no outro lado do extremo, regiões com temperatura média anual abaixo de 18°C tem o cultivo inviabilizado e, portanto, são classificadas também como inadequadas devido ao déficit térmico. De acordo com Pereira et al. (2008), nestas condições de temperatura, as plantas não conseguem finalizar o ciclo fenológico antes da primeira florada, situação que compromete a longevidade da cultura e contribui para a ausência de um período de repouso, que é necessário para a indução dos novos botões florais. Outro agravante, segundo os autores, é que a colheita danifica a nova florada, comprometendo a próxima safra, devido à presença de frutos em processos de maturação misturados com novas flores (PEREIRA et al., 2008). No caso do déficit hídrico, o cafeeiro arábica pode tolerar déficits de até 150 mm por ano. Em alguns períodos, o déficit hídrico pode ser benéfico para o cafeeiro quando coincide com o período de dormência da cultura (THOMAZIELLO et al., 2000). No entanto, déficits hídricos anuais superiores a 150 mm afetam a longevidade econômica da cultura.

No método de Luppi et al. (2014), as áreas adequadas, restritas e inadequadas para o cultivo do cafeeiro são notificadas, respectivamente, como 1, 2 e 3, para cada condição climática de temperatura do ar ou déficit hídrico (Tabela 4.1) e, em seguida, são passadas para porcentagem de aptidão através da Equação 4.1. Áreas inadequadas recebem 0% de aptidão.

$$PA_{CC} = \frac{100}{N \times 2} \quad (4.1)$$

onde, PA_{CC} é a Porcentagem de Aptidão para cada Condição Climática (CC) e N é a nota da faixa de aptidão. Esta classificação permite uma transformação de dados qualitativos em quantitativos contribuindo numa melhor compreensão da dimensão da aptidão.

O Zoneamento Agroclimático (ZA) é expresso em porcentagem de aptidão da cultura e é dado pela soma da aptidão por temperatura do ar (PA_{Temp} , em %) mais a aptidão por deficiência hídrica (PA_{DH} , em %) conforme a Equação 4.2. A Tabela 4.2 mostra a nova classificação proposta para o zoneamento agroclimático do cafeeiro arábica segundo Luppi et al. (2014). A esquematização do método é apresentada na Figura 4.1.

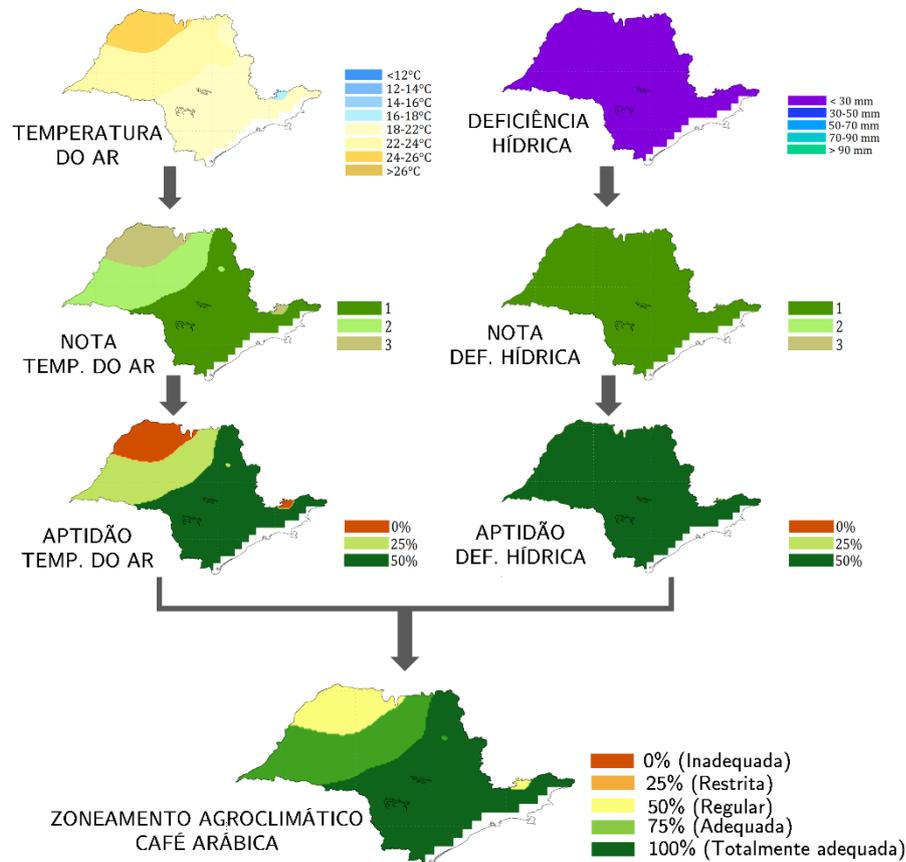
$$ZA = PA_{Temp} + PA_{DH} \quad (4.2)$$

Tabela 4.2 – Porcentagem de aptidão para o zoneamento agroclimático do cultivo do cafeeiro arábica. Temp.: Temperatura do ar. D.H.: Déficit Hídrico, P.A.: Porcentagem de Aptidão e Z.A.: Zoneamento Agroclimático.

Nota		Aptidão		P.A.		Z.A.	Classes
Temp.	D.H.	Temp.	D.H.	Temp.	D.H.		
1	1	Adequada	Adequada	50%	50%	100%	Totalmente adequada
1	2	Adequada	Restrita	50%	25%	75%	Adequada
1	3	Adequada	Inadequada	50%	0%	50%	Regular
2	1	Restrita	Adequada	25%	50%	75%	Adequada
2	2	Restrita	Restrita	25%	25%	50%	Regular
2	3	Restrita	Inadequada	25%	0%	25%	Restrita
3	1	Inadequada	Adequada	0%	50%	50%	Regular
3	2	Inadequada	Restrita	0%	25%	25%	Restrita
3	3	Inadequada	Inadequada	0%	0%	0%	Inadequada

Fonte: Adaptada de Luppi et al. (2014) e Eugenio et al. (2014).

Figura 4.1 – Esquema do método proposto por Luppi et al. (2014) contendo as etapas necessárias para realização do zoneamento agroclimático.



Esquema gerado apenas para ilustração do método. Dados observados do período de 1980 a 2005, disponibilizados numa grade regular de 25 km x 25 km por Xavier et al., 2015.

Fonte: Produção da autora

Em resumo, para este método, as áreas totalmente adequadas (100%) são aquelas onde as condições térmicas e hídricas são favoráveis ao cultivo do cafeeiro arábica; as áreas com restrição apenas de uma das condições climáticas são classificadas como sendo 75% aptas e, portanto, são tidas como adequadas; e áreas inadequadas (0%) são aquelas cujas características climáticas não são adequadas à exploração comercial da cultura, devido às grandes limitações térmicas e hídricas.

O método adiciona duas classes de aptidão, ou seja, áreas com 50% e 25%. No primeiro caso (50%), a cultura pode ocasionalmente encontrar aptidão por uma das

condições climáticas ou restrição por ambas, sendo classificado como regular. Neste caso, para a exploração comercial do cafeeiro, espera-se que os fatores de restrição sejam controlados. No caso de 25%, a cultura pode encontrar restrição ou inadequação por alguma das condições climáticas sendo classificada como restrita, o que torna essa classificação de risco para o cultivo do cafeeiro.

Inicialmente, foram produzidos campos médios anuais da temperatura do ar e da deficiência hídrica para a região de estudo. A deficiência hídrica anual (mm) foi estimada pelo Balanço Hídrico Climatológico (BHC) através do método de Thornthwaite e Mather (1955), com adaptações de Mendonça (1958). No cálculo do BHC foi considerado um armazenamento de água no solo de 100 mm, pois, de acordo com Meireles et al. (2009) este valor representa grande parte dos solos encontrados nas regiões cafeeiras do Brasil.

A evapotranspiração potencial (mm), requerida no cálculo do BHC, foi calculada pelo método de Penman-Monteith FAO (FAO 56. PM, Allen et al 1998). Este método estima a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ET_o) de acordo com a Equação 4.3 e é considerado o mais apropriado, pois incorpora os aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos da planta (CARVALHO et al. 2011; SEDIYAMA 1996).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \frac{\gamma 900 U_2(e_s - e_a)}{T_m + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4.3)$$

Onde, Δ - declividade da curva de pressão de vapor em relação a temperatura ($kPa^{\circ}C^{-1}$); Rn - saldo de radiação diário ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); G - fluxo de calor no solo ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); γ - coeficiente psicrométrico ($kPa^{\circ}C^{-1}$); U_2 - velocidade do vento a 2 metros ($m s^{-1}$); e_s - pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - pressão atual de vapor (kPa); T_m - temperatura média do ar ($^{\circ}C$).

A ET_o foi calculada em escala diária, a partir das variáveis de saída do modelo Eta-HadGEM em 5 km, e posteriormente passada para valores climatológicos mensais, para compor o cálculo do BHC.

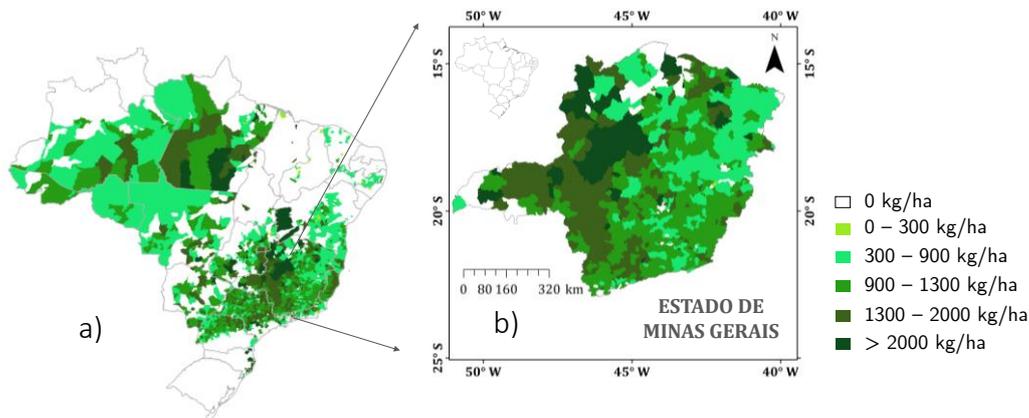
4.2.2. Produtividade atingível

A produtividade do cafeeiro arábica foi calculada de acordo com a aptidão climática, seguindo a equação 4.4 (BUNN, 2015):

$$Y_{ij} = Y_{\max,j} \times \left(1 - (1 - ZA_{ij})^2\right) \quad (4.4)$$

onde, Y_{ij} é a produtividade atingível (kg/ha) no ponto de grade horizontal do modelo; $Y_{\max,j}$ a máxima produtividade (kg/ha) e AZ_{ij} é o índice de zoneamento agroclimático (%). Na literatura, regiões com pleno desenvolvimento do cafeeiro arábica (totalmente adequada – 100%) apresentaram produtividades em torno de 2000 kg/ha (WINTGENS, 2009). Estes valores são encontrados nas áreas com ótimo desenvolvimento da cultura no Brasil, como no Estado de Minas Gerais (Figura 4.2). Em regiões com condições climáticas restritas, a produtividade atingível é considerada aproximadamente metade do valor ótimo (BUNN, 2015).

Figura 4.2 – Produtividade média do cafeeiro (kg/ha), em grão, dos (a) municípios brasileiros, para o período de 1990 a 2015, com destaque para (b) o estado de Minas Gerais.



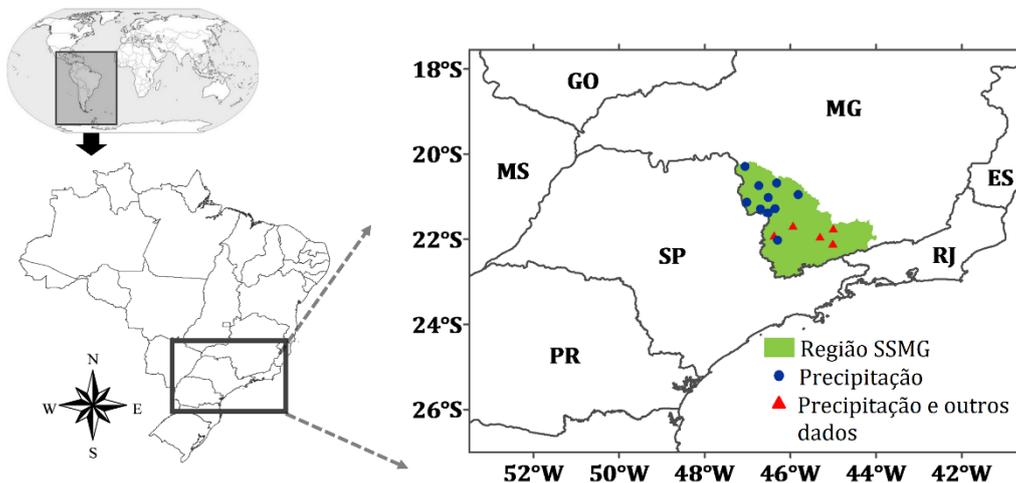
Dados de produtividade do cafeeiro (kg/ha) disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola Municipal (IBGE-PAM) através do portal SIDRA (<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>), link Tabela 106 (informações sobre culturas permanentes).

Fonte: Produção da autora.

4.2.3. Validação das simulações do Modelo Regional Eta

Com intuito de avaliar as saídas do modelo e identificar possíveis erros sistemáticos, a simulação do clima presente foi comparada com séries históricas selecionadas na área de estudo. Foram selecionadas 15 estações baseadas em uma melhor homogeneidade temporal das séries históricas disponíveis para o período 1961-2005 (Figura 4.3). Utilizaram-se dados diários da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dados de precipitação (mm) e dados de temperatura média (°C), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), velocidade do vento (m/s), radiação solar (MJ m^{-2}) e pressão à superfície (hPa) foram utilizados para estimar a ETo e validar o modelo Eta. Foram usados também dados de radiação solar do *Satellite Application Facility in Climate Monitoring* (CMSAF) (KARLSSON et al., 2012) e pressão à superfície do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (SAHA et al. 2010) para alguns pontos de estação com séries incompletas.

Figura 4.3 - Localização dos dados meteorológicos selecionados para a validação do Modelo Eta na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).



Fonte: Produção da autora.

A avaliação das simulações do Eta-HadGEM para o período *baseline* foi realizada comparando as séries temporais do modelo, extraídas para os pontos de grade

referente as estações, com as séries históricas observadas. As simulações de precipitação, ETo e temperatura a 2 m foram avaliadas através das médias mensais, do erro médio (BIAS) (Equação 4.5), do erro absoluto médio (MAE) (Equação 4.6), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 4.7) e do coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 4.8) de acordo com as equações abaixo.

$$BIAS = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} (V_s - V_o) \quad (4.5)$$

$$MAE = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} |V_s - V_o| \quad (4.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} (V_s - V_o)^2} \quad (4.7)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{NT} (V_o - \bar{V}_o) - (V_s - \bar{V}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{NT} (V_o - \bar{V}_o)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{NT} (V_s - \bar{V}_s)^2}} \quad (4.8)$$

onde, NT é o número total das simulações; V_o é a variável observada; V_s é a variável simulada. O BIAS mostra o desvio do modelo em relação à observação, indicando assim a tendência em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) a variável. O MAE mostra a magnitude média dos erros sem considerar sua tendência. O RMSE também mostra a magnitude média dos erros do modelo, no entanto credita um peso relativamente elevado a grandes erros. O r mostra o grau da relação linear entre o modelo e as observações, onde $r = 1$, demonstra correlação perfeita positiva, maior igual 0,8 e menor que 1, forte positiva, maior igual a 0,5 e menor que 0,8, moderada positiva, maior igual a 0,1 e menor que 0,5, fraca positiva, maior que 0 e menos que 0,1, ínfima positiva e 0, nula. Coeficientes negativos apresentam a mesma classificação dos positivos, no entanto com tendência negativa.

4.3. Resultados

4.3.1. Avaliação das simulações do período *baseline*

As avaliações das simulações do período *baseline* foram realizadas usando séries históricas de estações localizadas na mesorregião SSMG. A avaliação baseia-se nos ciclos anuais de evapotranspiração potencial, de temperatura média do ar e de precipitação (Figura 4.4). Estas variáveis foram escolhidas porque desempenham um papel importante na estimativa do déficit hídrico anual e no zoneamento agroclimático. A precipitação e a temperatura foram avaliadas para o período de 1961 a 2005, enquanto que a evapotranspiração foi avaliada para o período de 2000 a 2005, devido à indisponibilidade de séries históricas consistentes.

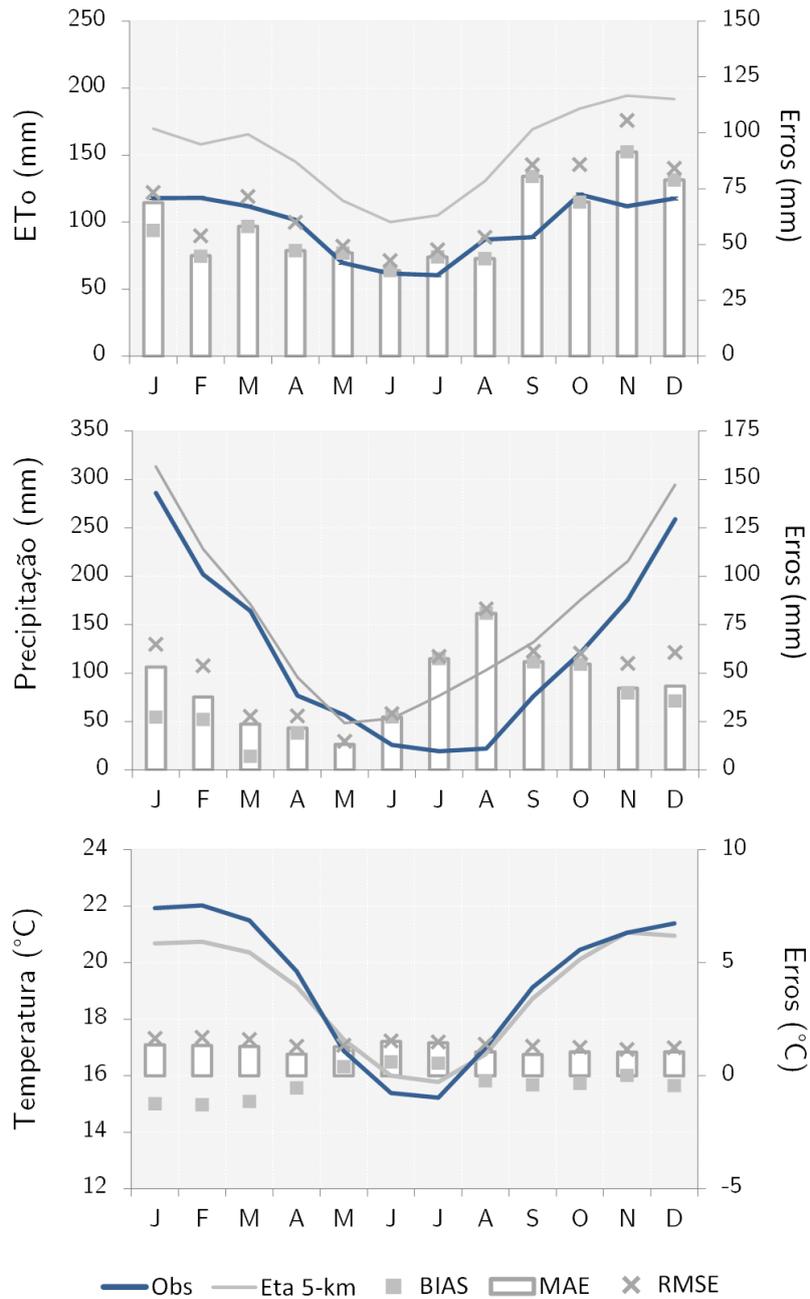
A variabilidade da evapotranspiração (ET_o) é razoavelmente reproduzida, mas os valores simulados são superestimados (Figura 4.4a). Nos meses do inverno austral, junho, julho e agosto, onde a temperatura e a evapotranspiração são mais baixas, as estimativas da ET_o são mais próximas das observações, e os erros médios e absolutos variam entre 38 e 44 mm/mês. O ciclo anual das chuvas na mesorregião SSMG é reproduzido razoavelmente pelas simulações, com valores mais intensos de precipitação nos meses de verão e menos intensos nos meses de inverno (Figura 4.4b). No entanto, nestas simulações, o modelo tende a apresentar maiores desvios em relação a observação nos meses entre julho e outubro, com superestimativas da ordem de 57 e 80 mm/mês.

A mesorregião SSMG exibe uma amplitude térmica de aproximadamente 7°C, que é bem representada pela simulação (Figura 4.4c). A temperatura média mais alta ocorre em janeiro, de cerca de 22°C, e a mais baixa em junho, de cerca de 16°C. Nos meses de agosto a novembro, os erros médios são próximos de zero e os erros absolutos médios próximos de 1°C.

A Tabela 4.3 resume o erro médio (BIAS), o erro médio absoluto (MAE), o erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação (r). Em geral, o modelo apresenta bom desempenho com alto coeficiente de correlação e baixo valor de BIAS para a temperatura do ar. As simulações para a ET_o e a precipitação mostram

erros significativos, porém apresentam altos valores de correlação, evidenciando o desempenho razoável do modelo também nas simulações destas variáveis.

Figura 4.4 - Ciclo anual da a) evapotranspiração potencial (mm), b) precipitação (mm) e c) temperatura do ar (°C) para mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). O eixo da direita nas figuras se refere aos erros (MAE, BIAS e RMSE) do Modelo Eta-HadGEM 5 km.



Fonte: Produção da autora.

Tabela 4.3 – Erro médio (BIAS), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação (r) da evapotranspiração potencial (ETo), precipitação (Prec) e temperatura (Temp) entre as simulações do Modelo Eta-HadGEM 5 km e as observações para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).

Variável	BIAS	MAE	RMSE	r
ETo (mm)	58,2	59,3	67,7	0,89
Prec (mm).	35,3	89,9	114,8	0,95
Temp (°C)	-0,3	1,6	1,9	0,98

Fonte: Produção da autora.

4.3.2. Projeções climáticas

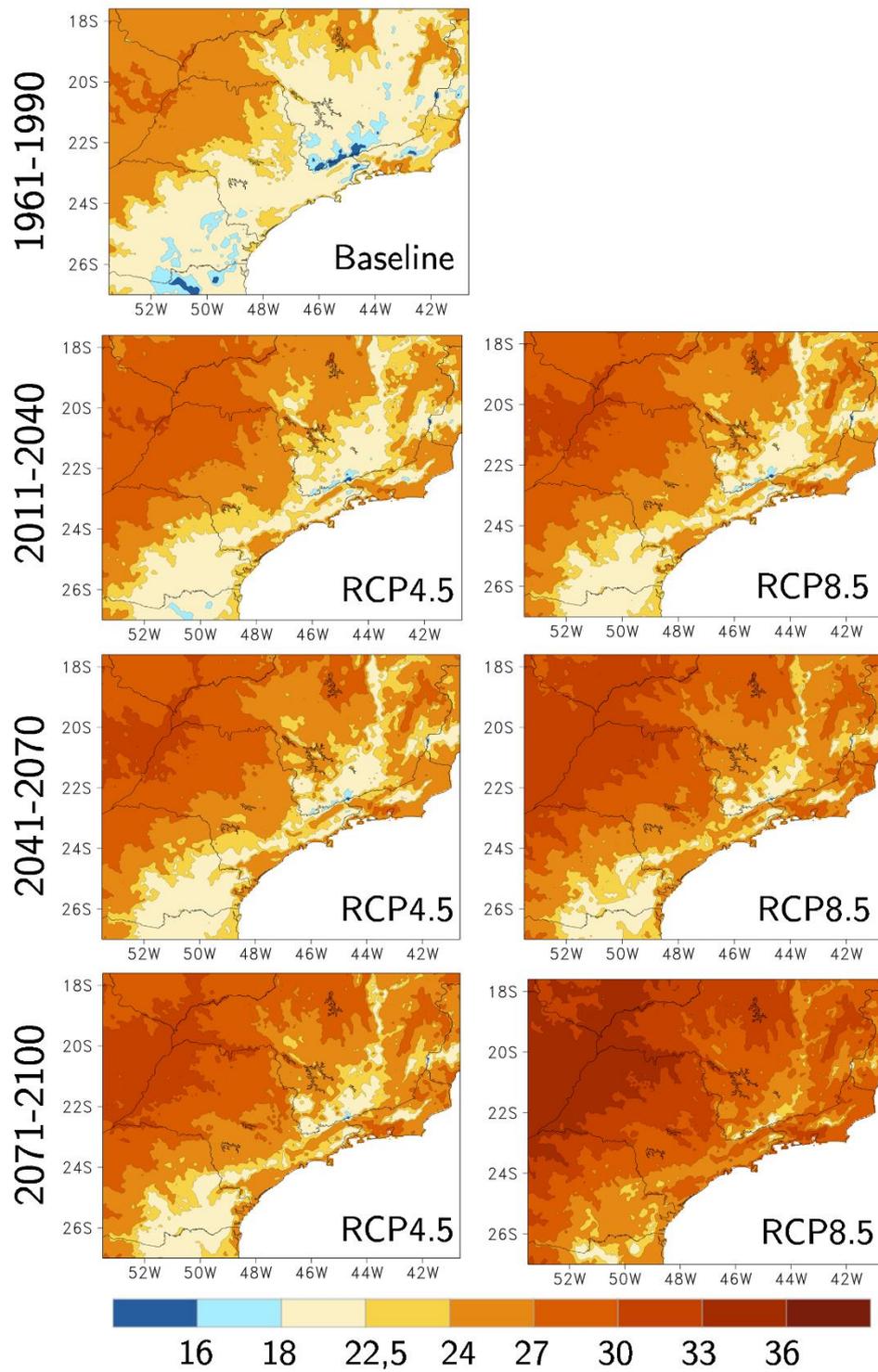
As projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 regionalizadas em 5 km, a partir do modelo Eta, sobre o SEB são mostradas na Figuras 4.5 e 4.6. As simulações climáticas do período *baseline* são incluídas para permitir uma comparação entre os climas futuros e o clima presente. A temperatura do ar e o déficit hídrico estão agrupados em períodos (“*timeslices*”) de 30 anos: 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

As projeções mostram grandes mudanças na temperatura do ar em ambos os cenários RCP (Figura 4.5). Em grande parte do SEB, onde a temperatura varia aproximadamente entre 18°C e 26°C no período *baseline*, a temperatura aumenta cerca de 4°C a 6°C. Uma área sujeita a mudanças em termos de maior aquecimento está localizada em grande parte do estado de São Paulo, sudoeste de Minas Gerais, nordeste de Mato Grosso do Sul e sul de Goiás, entre as coordenadas 18°S e 22°S, e 48°W e 53°W. Nesta área, o aquecimento no cenário pessimista pode atingir mais de 8°C até o final do século XXI (2071-2100). No sul de Minas Gerais e no norte de São Paulo, entre 20°S e 23°S, e 44°W e 48°W, importantes áreas cafeeiras, onde atualmente ocorre o crescimento do café com temperaturas próximas de 18-22°C, pode se tornar restrita ou inadequada devido ao aquecimento. No entanto, em algumas regiões montanhosas o cultivo do café pode torna-se adequado pela temperatura do ar, mas o plantio de café nessas áreas poderá ter o manejo

complicado, especialmente em relação à colheita, devido à dificuldade da entrada de máquinas no campo em função da declividade do terreno.

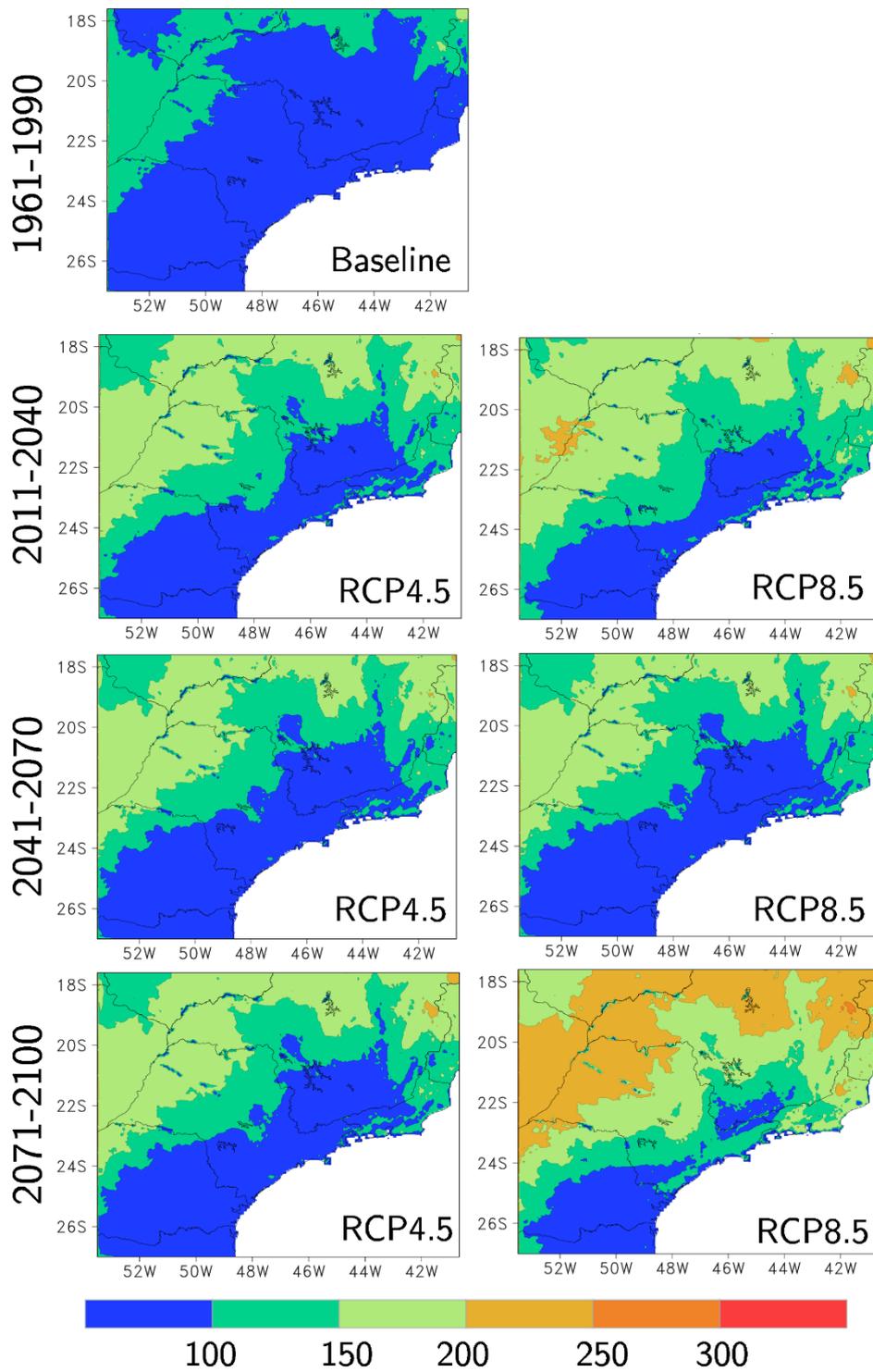
As projeções do déficit hídrico mostram mudanças menos drásticas (Figura 4.6). Quase toda a região que apresenta, no clima presente, valores adequados para o cultivo do cafeeiro arábica, ou seja, abaixo de 150 mm/ano passa a exibir uma faixa mais ampla de áreas restritas e inadequadas somente no final do século XXI, no caso do cenário RCP8.5. No cenário RCP4.5, os valores de déficit hídrico ao longo do século XXI permanecem, em grande parte, adequados a no máximo restrito ao cultivo da cultura, ou seja, entre 150 e 200 mm/ano.

Figura 4.5 - Média anual da temperatura a 2m (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km para o período *baseline* e os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.6 - Média anual da deficiência hídrica (mm) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km para o período *baseline* e os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Produção da autora.

4.3.3. Aptidão do cafeeiro em cenários climáticos futuros

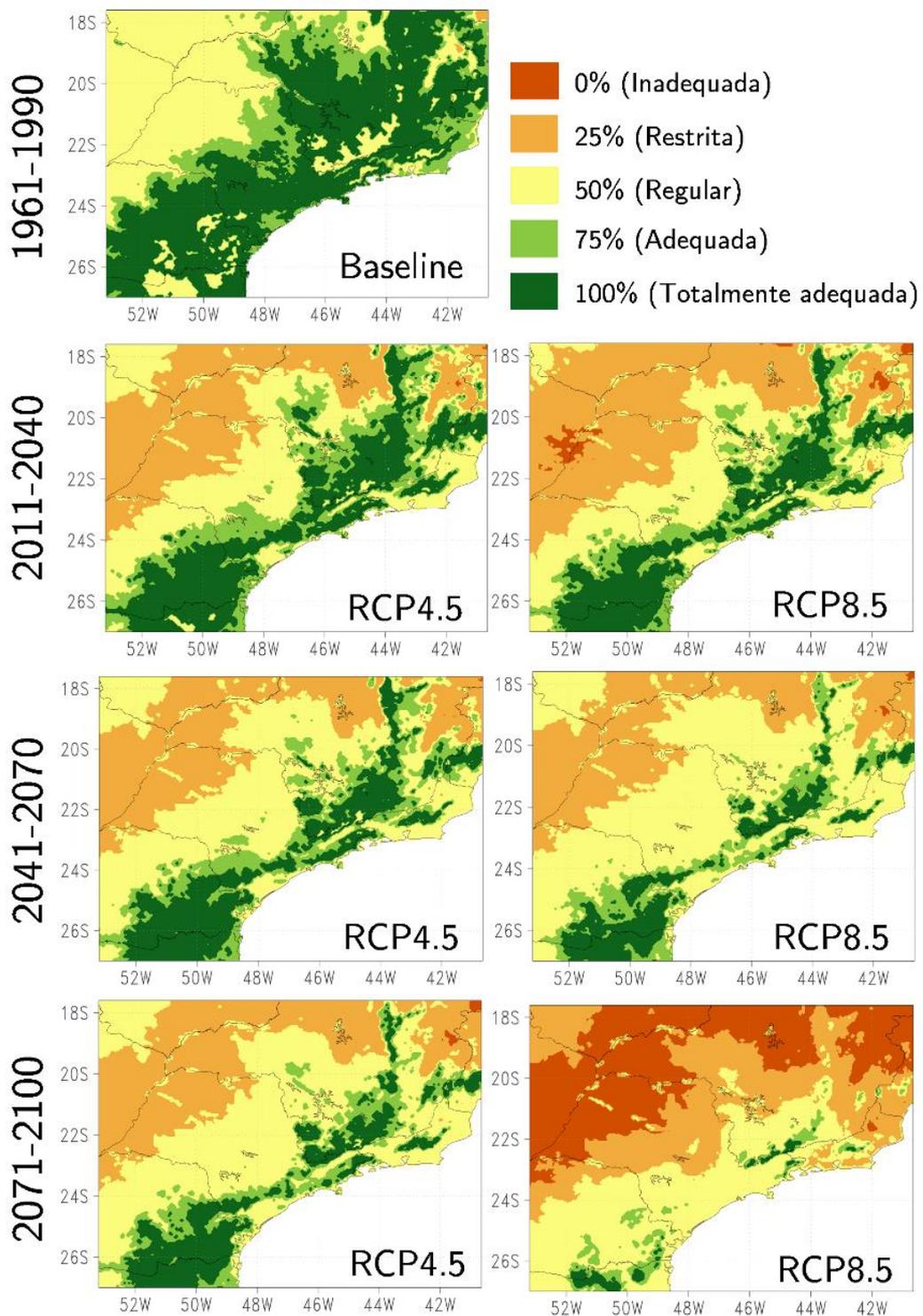
No clima atual, o zoneamento agroclimático para a cultura do cafeeiro arábica mostra que a região SEB apresenta 50% a 100% de aptidão, ou seja, varia da condição regular a totalmente adequada (Figure 4.7). Os fatores restritivos estão associados apenas a condições de temperatura do ar inadequadas, como por exemplo excesso térmico no Oeste da região e déficit térmico em áreas montanhosas. Ao longo do século, as áreas totalmente adequadas e adequadas para produção reduzem consideravelmente em ambos os cenários climáticos, particularmente no cenário RCP8.5. O aumento de áreas restritas (25%) e inadequadas ocorre quase que exclusivamente devido à elevação da temperatura, a qual apresenta elevação de cerca de 4°C a 8°C até o final do século XXI.

Conforme relatado em estudos anteriores (ASSAD et al., 2004, PINTO et al., 2008), no cenário de maior concentração de CO₂, o cultivo do cafeeiro será restrito a áreas de altitudes mais elevadas. Diferentemente do RCP8.5, no cenário RCP4.5 não ocorrem aparecimentos expressivos de áreas inadequadas, demonstrando impactos menos drásticos, todavia ocorrem aumentos das áreas restritas e regulares (25% - 50%). As áreas classificadas como regulares (50%) mostram aptidão devido a uma das condições climáticas ou restrição em ambas as condições, sugerindo que o cultivo do cafeeiro arábica não estaria totalmente inviabilizado, no entanto, para fins comerciais, seria necessário que os fatores restritivos fossem atenuados.

Muitas estratégias para mitigar o efeito de altas temperaturas já vêm sendo realizadas, tais como aplicações de práticas agronômicas (sombreamento, adubação, irrigação etc.) e melhoramento genético. Alguns estudos verificaram que o sombreamento do cafeeiro através da consorciação com espécies arbóreas, por exemplo, promove um microclima mais favorável ao desenvolvimento e protege a planta de temperaturas extremas (RICCI et al., 2011; MANCUSO et al., 2013; PARTELLI et al., 2014; OLIOSI et al., 2016; SILVEIRA et al., 2016), proporcionando uma diminuição das flutuações da temperatura do ar em até 2°C a 3°C (PEZZOPANE et al., 2008; CAMARGO et al., 2008). Todavia, é importante

ressaltar que no cenário RCP4.5 é pressuposto um aumento da temperatura média global de até 2,6°C, ou seja, próximo do limite negociado no “Acordo de Paris”, estabelecido abaixo de 2°C (ONU, 2015) considerada uma meta até então ambiciosa. Em escala regional, como apresentado na seção anterior, a temperatura, no cenário RCP4.5, poderá aumentar cerca de 4°C no SEB, o que sinaliza que as atuais práticas de cultivo passem a considerar, no mínimo, tal aumento e os estudos de melhoramento genéticos continuem a fortalecer pesquisas com genótipos de café arábica mais tolerantes ao calor.

Figura 4.7 – Zoneamento agroclimático para o cultivo do cafeeiro arábica no sudeste do Brasil, simulado pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km. Período *baseline* e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5.

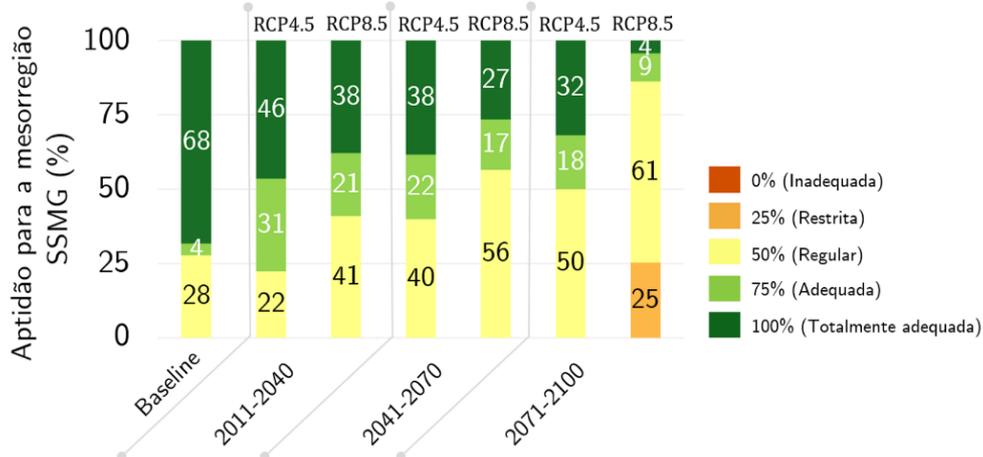


Fonte: Produção da autora.

4.3.4. Impacto das mudanças climáticas na mesorregião sul-sudoeste de Minas Gerais

A Figura 6 mostra a aptidão do cafeeiro arábica, em porcentagem de área, na mesorregião SSMG durante o clima presente e nas projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5. A mesorregião SSMG exibe, em geral, condições ótimas para o desenvolvimento da cultura, já que 72% da área é totalmente adequada e adequada. Ao longo do século XXI, fica evidente a diminuição das áreas sem nenhuma restrição climática, com reduções de cerca de 22%, 30% e 36%, nos *timeslices* de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente, no caso do cenário RCP4.5. Já para o cenário RCP8.5, as reduções das áreas totalmente adequadas são mais significativas, especialmente no final do século. A área totalmente adequada, que cobre 68% no clima atual, reduz à apenas 4% em 2071-2100. De meados até o final do século, as áreas com aptidão regular aumentam, enquanto que as áreas restritas (25%) aparecem apenas no último *timeslice*. As áreas totalmente adequadas estão presentes apenas em regiões com topografias mais altas, devido à presença da Serra da Mantiqueira (Figuras mostradas na seção 4.3.3). Na mesorregião SSMG, a expansão de áreas com aptidão regular também serve de alerta, tendo em vista que na classificação está associada a inadequação devido a aumentos significativos da temperatura do ar, uma vez que o déficit hídrico aumentou, mas não atingiu valores inadequados ao cultivo do cafeeiro.

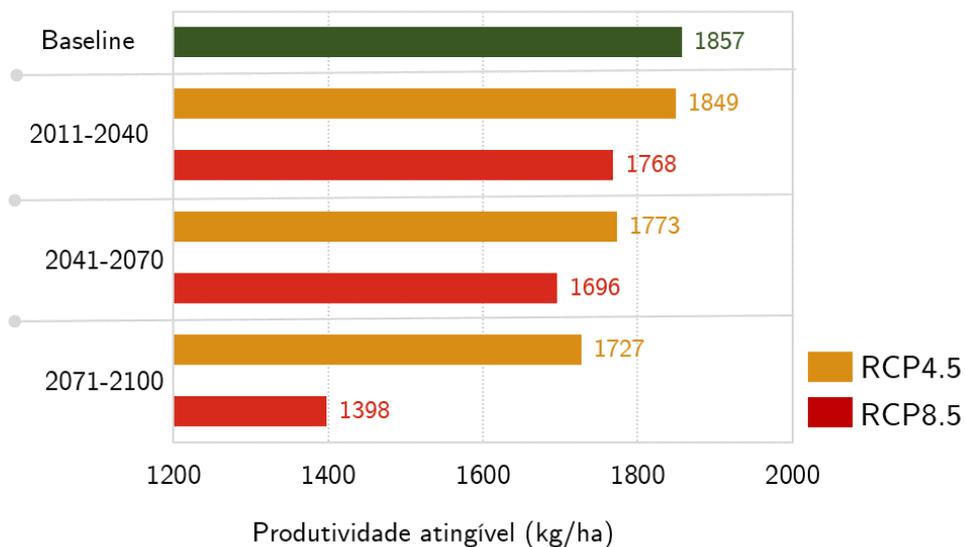
Figura 4.8 - Aptidão do cafeeiro arábica para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), simulada pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km. Período *baseline* e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5.



Fonte: Produção da autora.

Os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade são inferidos através da Figura 4.9 e Tabela 4.4. Sob os cenários do IPCC AR5, a produtividade do cafeeiro arábica diminui na mesorregião SSMG devido à redução das áreas totalmente adequadas e adequadas para o desenvolvimento da cultura (Figura 4.9). A produtividade média para o período 2011-2040 não apresenta reduções significativas tanto no cenário RCP4.5 quanto no cenário de maior concentração dos GEE, RCP8.5. No cenário de concentrações de CO₂ mais brandas são projetadas redução mais significativa apenas no *timeslice* de 2071-2100, com uma diminuição de aproximadamente 7%. No cenário de alta concentração de CO₂, as projeções mostram quedas em torno de 9% e 25%, as quais correspondem reduções da produtividade atingível de cerca de 170 e 460 kg/ha.

Figure 4.9 - Produtividade atingível do cafeeiro arábica (kg/ha) na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período *baseline* e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP8.5



Fonte: Produção da autora.

No âmbito microrregional, nota-se que a produtividade atingível, ao longo do século XXI, sob os cenários do IPCC AR 5, mostra diferentes tendências (Tabela 4.4). Vale ressaltar que as microrregiões foram agrupadas em parte leste, central e oeste com intuito de propiciar uma melhor apresentação dos resultados. As microrregiões de Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço, Andrelândia e Santa Rita do

Sapucaí foram agrupadas como parte leste; Poços de Caldas, Alfenas e Varginha como parte central; e São Sebastião do Paraíso e Passos como parte oeste.

Nota-se que as microrregiões da parte leste mostram aumento da produtividade até meados do século XXI, independentemente do cenário RCP, com exceção de Santa Rita do Sapucaí que apresenta reduções em todos os *timeslices*. No período *baseline*, tais microrregiões, localizadas em altitudes médias superiores a 1000 m, não apresentavam valores de produtividade mais altos devido ao déficit térmico. Todavia, as projeções do aumento da temperatura do ar favorecem à adequação desta condição climática e conseqüentemente passam a apresentar valores ótimos ao desenvolvimento do cafeeiro. Os impactos negativos, com queda da produtividade, são verificados apenas em 2071-2100 no cenário de alta concentração de CO₂, com exceção de Itajubá e Andrelândia as quais são beneficiadas com aumento da produtividade em ambos cenários RCP.

Na parte central, com exceção de Poços de Caldas, verifica-se quedas da produtividade atingível ao longo de todo século XXI, com reduções mais acentuadas no cenário RCP8.5. Em Alfenas e Varginha as reduções chegam a 32% e 37%, respectivamente, no último *timeslice*. Em Poços de Caldas, assim como notado nas microrregiões da parte leste, ocorre aumento da produtividade devido a adequação da temperatura do ar. Nesta microrregião, quedas da produtividade são notadas apenas de meados até final do século quando considerado o cenário RCP8.5. Diferentemente da parte leste e central, na parte oeste ambos os cenários apresentam impactos negativos na produtividade da cultura. Em Passos, por exemplo, a produtividade atingível pode cair em cerca de 50% em 2071-2100, no caso do cenário de alta concentração de CO₂. Nestas microrregiões, as reduções da produtividade não são mais acentuadas devido à demanda hídrica não atingir valores inadequados ao desenvolvimento do cafeeiro (Figuras apresentadas na seção 4.3.2).

Em geral, tem-se que, ao longo do século XXI, as microrregiões que apresentam altitudes médias acima de 1000 m, como as da parte leste (Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço e Andrelândia) e a de Poços de Caldas (central), são beneficiadas com

aumento da produtividade, sendo mais contundente quando considerado o cenário RCP4.5. Em contrapartida, impactos negativos na produtividade, com reduções em ambos os cenários, são notados nas microrregiões da parte central e oeste.

Tabela 4.4 - Produtividade Atingível do cafeeiro arábica (ProdAt.), em kg/ha, porcentagem de mudança (% mud.) e tendência (Tend.) para as microrregiões da mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), com suas respectivas altitudes médias (Alt.) (m). Período *baseline* e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP 8.5, divididos em *timeslices* de 30 anos. ↑ representa tendência positiva, ou seja, aumento da produtividade em relação ao período *baseline* e ↓ representa tendência negativa (redução).

Região SSMG/ Parte	Microrregião	Alt.	Valor/ Indicativo	1961-1990	2011-2040		2041-2070		2071-2100		
				<i>Baseline</i>	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
Leste	Pouso Alegre	1160	ProdAt.	1694	1945	1908	1920	1872	1908	1603	
			% mud.	-	15	13	13	11	13	-5	
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↓	
	Itajubá	1200	ProdAt.	1676	1893	1885	1894	1907	1919	1691	
			% mud.	-	13	12	13	14	15	1	
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	São Lourenço	1167	ProdAt.	1746	1886	1882	1882	1885	1871	1630	
			% mud.	-	8	8	8	8	7	-7	
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↓	
	Andrelândia	1143	ProdAt.	1597	1940	1961	1963	1967	1965	1703	
			% mud.	-	22	23	23	23	23	7	
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Santa Rita do Sapucaí	970	ProdAt.	1904	1949	1822	1830	1695	1754	1510		
		% mud.	-	2	-4	-4	-11	-8	-21		
		Tend.	-	↑	↓	↓	↓	↓	↓		
Central	Poços de Caldas	1075	ProdAt.	1843	1956	1894	1898	1755	1847	1500	
			% mud.	-	6	3	3	-5	0,3	-19	
			Tend.	-	↑	↑	↑	↓	↑	↓	
	Alfenas	880	ProdAt.	1974	1831	1619	1623	1538	1564	1351	
			% mud.	-	-7	-18	-18	-22	-21	-32	
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
	Varginha	897	ProdAt.	1978	1844	1676	1675	1572	1614	1249	
			% mud.	-	-7	-15	-15	-21	-18	-37	
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
	Oeste	São Sebastião do Paraíso	932	ProdAt.	1997	1759	1650	1661	1510	1531	1236
				% mud.	-	-12	-17	-17	-24	-23	-38
				Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Passos		876	ProdAt.	1962	1649	1603	1603	1521	1546	1003	
			% mud.	-	-16	-19	-19	-23	-22	-49	
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	

Fonte: Produção da autora.

4.4. Conclusões do capítulo

Baseado no *downscaling* dinâmico do modelo Eta em 5km dos cenários do IPCC AR5, RCP4.5 e RCP8.5, grande parte do Sudeste do Brasil (SEB) sofrerá modificações expressivas nas áreas atualmente aptas ao desenvolvimento do cafeeiro arábica. Atualmente, a região, em quase sua totalidade, é adequada ao cultivo da cultura, variando de totalmente adequada a no máximo regular, devido ao excesso ou déficit térmico. No entanto, ao longo do século XXI, considerando os dois cenários de concentração de CO₂, as projeções mostram grande redução das áreas totalmente adequadas e adequadas, aumento das áreas regulares e aparecimento das áreas restritas e inadequadas. Tais reduções são causadas pelo aumento da temperatura média do ar de cerca de 4°C a 8°C no cenário RCP8.5.

De acordo com as projeções, na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), a produtividade atingível do cafeeiro deverá reduzir em cerca de 25% no final do século XXI. Nesta mesorregião, as áreas totalmente adequadas se deslocam para regiões de maior altitude, o que pode dificultar o manejo da cultura. Além disso, no cenário pessimista, aumentam as áreas de alto risco climático devido ao excesso térmico.

Em escala espacial mais detalhada, tem-se que as microrregiões do SSMG com altitudes mais elevadas (superior a 1000 m) são beneficiadas pelo aumento da temperatura do ar e conseqüentemente aumento da produtividade atingível do cafeeiro até meados do século XXI, corroborando com resultados mencionados anteriormente. Enquadram-se neste contexto as microrregiões de Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço, Andrelândia e Poços de Caldas. Todavia, apenas as microrregiões de Andrelândia e Itajubá são beneficiadas em ambos cenários RCP e em todos os *timeslices*. Nas outras microrregiões, a saber: Santa Rita do Sapucaí, Alfenas, Varginha, São Sebastião do Paraíso e Passos, os impactos das mudanças climáticas são negativos, com reduções da produtividade de cerca de 21 a 50% quando considerado o cenário de alta concentração de CO₂.

Em resumo, no caso desses cenários ocorrerem de fato, para manter a produção de café no SEB, tanto em quantidade quanto em qualidade, é necessário propor

medidas de adaptação que levem em consideração a elevação de temperatura de pelo menos 2°C a 4°C, considerando as características genéticas e fisiológicas atuais das cultivares de café arábica nessa região de estudo.

5 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO ARÁBICA: MODELO INLAND

5.1. Introdução

A estimativa prévia de safras agrícolas e o conhecimento das culturas ao longo do seu ciclo de crescimento e desenvolvimento são importantes ferramentas que podem auxiliar o setor agrícola a tomar importantes decisões frente às intempéries, seja para o planejamento do abastecimento, seja para orientações referentes ao mercado mundial. Sendo assim, nos últimos anos diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de buscar um melhor entendimento da relação complexa clima-cultura, e dos efeitos das variações climáticas sobre a produtividade cafeeira (SANTOS, 2002). Com este intuito alguns modelos agrometeorológicos (TOSELLO; ARRUDA, 1962; CAMARGO et. al., 1984, LIU; LIU, 1988; PICINI et al., 1999; SANTOS; CAMARGO, 2006), agrometeorológicos espectrais (TARDIN et al., 1992; EPIPHANIO et al. 1994; LIBARDI et al., 1998; MOREIRA et.al., 2004; RAMIREZ et al., 2006; ROSA, 2007; ROSA et al., 2010; SOUSA et al., 2011; AMARAL et al., 2013) e mecanísticos/semi-mecanístico (SANTOS, 2002; BARROS, 2016) foram testados para a cafeicultura brasileira.

Tosello e Arruda (1962) usaram um modelo agrometeorológico para relacionar o rendimento do cafeeiro a precipitação e a deficiência hídrica em 14 municípios cafeeiros no estado de São Paulo. Os autores verificaram que as precipitações dos períodos de abril-setembro e julho-setembro foram as que apresentaram correlação mais estreita com as produções, havendo um peso maior para as precipitações ocorridas de julho a setembro, que constituem o período final da estação seca e coincidem com a época de florescimento do cafeeiro.

Um modelo agrometeorológico estatístico com base em regressão linear, para estudar os efeitos das chuvas na produtividade do cafeeiro em localidades também do estado de São Paulo foram usados por Camargo et al. (1984). Os autores encontraram boas correlações com a produtividade no período de julho a setembro, correspondente às fases de dormência das gemas e início do florescimento. Neste estudo foi mencionado que os efeitos combinados da

produtividade do ano anterior e os parâmetros pluviométricos contribuíram significativamente para a variação observada na produtividade final. Os autores ressaltaram também a importância da inclusão da produção do ano anterior sobre a estimativa da produtividade do cafeeiro (CAMARGO et al., 1984).

Liu e Liu (1988) desenvolveram três modelos de previsão de safra do café para o estado de Minas Gerais: um modelo simples - produtividade em nível estadual, modelo bienal - com anos separados em pares e ímpares para caracterização da oscilação da produtividade e modelo em escala microrregional. Os melhores resultados foram encontrados para o modelo simples e melhor desempenho estatístico foi encontrado para o modelo bienal.

Picini et al. (1999) parametrizaram e testaram modelos matemáticos agrometeorológicos que relacionaram a fenologia, a bienalidade e a produtividade do cafeeiro. Os modelos se basearam na penalização da produtividade potencial do ano anterior e das relações ER/EP (evapotranspiração real/evapotranspiração potencial), derivados de balanços hídricos decendiais durante os estádios fenológicos. A penalização foi feita à medida que houve restrição hídrica para a planta durante os diferentes estádios fenológicos, considerando coeficientes de resposta da cultura ao suprimento hídrico, incorporados numa função aditiva ou multiplicativa. Os autores obtiveram melhores resultados, após a adaptação da produtividade do ano anterior, para o método aditivo desenvolvido por Stewart et al. (1976) e proposto por Doorenbos e Kassam (1979). Os melhores ajustes foram obtidos com modelo aditivo que relaciona o fator hídrico durante os trimestres de junho-julho-agosto, setembro-outubro-novembro e dezembro-janeiro-fevereiro. O ajuste da produtividade do modelo, levando-se em conta a produtividade do ano anterior, mostrou-se relevante na estimativa final da produção cafeeira por incorporar deste modo a bienalidade desta cultura. Os autores verificaram também que a produtividade cafeeira é mais sensível ao estresse hídrico durante o período final da dormência das gemas ao florescimento e do período final do florescimento ao início da formação do grão.

Outros fatores climáticos, além do déficit hídrico, podem interferir na produtividade do cafeeiro, tais como temperaturas adversas ocorridas em diferentes estádios fenológicos da cultura, podendo ser considerada também nos modelos de estimativa de produtividade. Santos e Camargo (2006), com o intuito de incluir a temperatura na estimativa da produtividade, modificaram e parametrizaram um modelo matemático agrometeorológico para o cafeeiro arábica, considerando diferentes regiões do estado de São Paulo. O modelo dos autores também se baseia na penalização da produtividade potencial da cultura em função do déficit hídrico quantificado através da relação ER/EP, ajustadas por coeficientes de sensibilidade da cultura em diferentes fases fenológicas e os efeitos da produtividade do ano anterior, como encontrado também em Picini et al. (1999). Uma informação inovadora apresentada neste estudo foi o início da florada, que de acordo com os autores ocorre quando há um acúmulo de 350 mm de EP, contabilizado a partir do primeiro decêndio de abril e somado com a ocorrência de no mínimo 5 mm de chuva. Desse modo, a penalização pelo déficit hídrico se inicia concomitantemente com a florada (setembro ou outubro), com maiores valores de penalização entre os meses de outubro a janeiro. Em relação o fator térmico, houve influência substancial das geadas e temperaturas altas sobre a produtividade do café.

Além de modelos puramente agrometeorológicos outras ferramentas como uso de técnicas de sensoriamento remoto também têm sido aplicadas para monitorar a cafeeicultura brasileira (TARDIN et al., 1992; EIPHANIO et al. 1994; LIBARD et al., 1998; MOREIRA et.al., 2004; RAMIREZ et al., 2006; ROSA, 2007; ROSA et al., 2010; SOUSA et al., 2011; AMARAL et al., 2013). A inserção de um termo espectral, representado pelo índice de vegetação, a um modelo agrometeorológico (modelos agrometeorológicos – espectrais) tem sido usada para obtenção do rendimento do cafeeiro em várias regiões produtoras do Brasil. Nestes modelos é suposto que o termo agrometeorológico represente as condições de radiação solar incidente, temperatura, umidade do ar e de disponibilidade hídrica, ao passo que o termo espectral represente as diferentes práticas de manejo, cultivares e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico. Vale ressaltar que o termo

agrometeorológico considerado nestes modelos segue o método proposto por Doorenbos e Kassam (1979), como encontrado na maior parte dos modelos puramente agrometeorológicos. Amaral et al. (2013) utilizaram um modelo agrometeorológico espectral para estimar a produtividade cafeeira em dois municípios do estado da Bahia. Os autores utilizaram imagens do sensor MODIS para extrair informações do índice de vegetação melhorado *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Os resultados encontrados, neste estudo, não foram satisfatórios quando comparado a outros modelos mais abrangentes (modelo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE), que em geral, aplicam-se bem a cultivos de áreas mais extensas, plantações de maior porte e de ciclo vegetativo regular.

Em relação aos modelos mecanísticos, Santos (2002) desenvolveu um modelo dinâmico de previsão de produtividade para o cafeeiro baseado nos principais processos físicos e fisiológicos da cultura. O modelo foi testado comparando-se os dados de produtividade de Viçosa–MG aos resultados de produtividade simulada. Os resultados indicaram que o modelo foi capaz de prever com acurácia a produtividade do cafeeiro. No entanto, apesar dos resultados satisfatórios, o autor elucida que considerou para o período de crescimento da cultura apenas as restrições hídricas sugerindo para estudos posteriores à inclusão de um método que contemple mais os aspectos existentes na interação solo-planta-atmosfera, tais como a interação do sistema radicular da cultura com o sistema solo, entre outros (SANTOS, 2002). Recentemente, Barros (2016) adaptou o modelo semi-mecanístico 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) com intuito de estimar o crescimento e a produção do cafeeiro arábica. O modelo foi avaliado através de dados experimentais da região de Lavras em Minas Gerais e obteve resultados satisfatórios, podendo ser posteriormente calibrado e validado.

Em resumo, tem-se que a maior parte dos modelos de produtividade desenvolvidos e/ou aplicados para o cafeeiro disponíveis na literatura, objetivou buscar os efeitos do clima sobre a produção, priorizando em sua maior parte o déficit hídrico através da utilização do método de Doorenbos e Kassam (1979). Existe uma lacuna na modelagem de café de modelos que integrem mais robustamente a interação do sistema solo-planta-atmosfera como um todo, incluindo principalmente os

processos físicos e fisiológicos da cultura. Outra restrição é que a maior parte dos modelos existentes é de caráter empírico, desfavorecendo, desse modo, para uma extrapolação espacial e temporal dos resultados. Diante disso, ocorre uma grande limitação da aplicação de tais modelos quando se pretende realizar estudos dos impactos das mudanças climáticas na cultura, os quais necessitam de simulações a longo prazo, geralmente no mínimo da ordem de décadas.

A maior parte dos estudos já realizados para inferir a produtividade cafeeira em cenários climáticos futuros não consideraram simulações de crescimento da cultura. Como já mencionado no Capítulo 4, as avaliações dos impactos das mudanças climáticas no cafeeiro foram baseadas, em grande parte dos estudos, apenas nos zoneamentos agroclimáticos das áreas atualmente aptas ao desenvolvimento da cultura a nível nacional e mundial. O zoneamento agroclimático é uma ferramenta primordial nestas avaliações, todavia não inclui os efeitos diretos do aumento do CO₂ atmosférico, como projetados pelos cenários do IPCC. Neste contexto, apenas estudos experimentais, realizados através de câmaras de crescimento fechadas, em câmaras de topo aberto ou totalmente ao ar livre, como no sistema FACE (do inglês, *Free Air CO₂ Enrichment*) realizado pela Embrapa Meio Ambiente (Climapest FACE, 2013), tem mostrado os efeitos do enriquecimento do CO₂ no cafeeiro (RAMALHO et al., 2013; MARTINS et al., 2014a; BATISTA, 2015; GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2016; TOZZI; GHINI, 2016). Parece haver um consenso entre os resultados de que o cafeeiro cultivado sob elevado CO₂ é fortemente beneficiado, com aumento expressivo da taxa fotossintética líquida devido à redução da taxa de fotorrespiração (RAMALHO et al., 2013; GHINI et al. 2015; RODRIGUES et al., 2016). Ramalho et al. (2013), por exemplo, mostraram que o ambiente mais enriquecido com dióxido de carbono (700 μmol mol⁻¹ de CO₂) contribuiu para um aumento de 34 a 49% na assimilação do CO₂ pelo cafeeiro. Em Ghini et al. (2015), além do aumento da taxa fotossintética os resultados demonstram também aumento da eficiência do uso da água, maior crescimento das plantas e produção de grãos e uma menor incidência do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*). Rodrigues et al. (2016) mostraram que elevada concentração de CO₂ contribui enormemente para

mitigar os impactos negativos das altas temperaturas no metabolismo foliar, favorecendo altas taxas fotossintéticas mesmo até em 42°C, sugerindo que em cenários de aumento da temperatura do ar os impactos no cafeeiro não devem ser drásticos como previamente projetados. DaMatta et al (2016) reforçaram os resultados de Ghini et al (2015) e sugeriram que o cafeeiro, assim como outras espécies onde a fotossíntese é limitada em grande parte pela difusão de CO₂, irá se favorecer com o aumento do CO₂ na atmosfera. Portanto, o CO₂ é um elemento-chave quando se pretende avaliar a produtividade do cafeeiro em cenários climáticos futuros.

Deste modo, o objetivo deste capítulo é o de demonstrar, inicialmente, a inserção do cafeeiro no Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND), incluindo os ajustes das etapas fisiológicas e climáticas. Posteriormente, avaliou-se os impactos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro arábica, gerada através do INLAND com a cultura do café implementada em alta resolução espacial. Para isso, o INLAND foi forçado pelas projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, regionalizados através do Modelo Eta a partir das condições de contorno lateral do modelo HadGEM2-ES (Lyra et al., 2017). O Modelo INLAND integra grande parte dos processos da superfície terrestre, representando mais robustamente os efeitos físicos e fisiológicos do dossel, fenologia e ciclo de carbono terrestre e permite simulações dos climas futuros com ou sem incremento do CO₂ atmosférico. O modelo foi, assim, adaptado, calibrado e validado para representar as tendências da produtividade do cafeeiro arábica na mesorregião SSMG. O INLAND-*coffee* (denominado assim a partir dessa pesquisa) agora integra a lista dos pouquíssimos modelos mecanísticos na simulação da produtividade cafeeira, além de ser o único, até o presente momento, a ser usado em simulações espaciais e multidecenais.

5.2. Dados e metodologia

São apresentadas a seguir uma breve descrição do INLAND, a estratégia utilizada na implementação do cafeeiro, assim como a configuração e os dados usados na inicialização e validação do modelo. Descrições do modelo climático Eta e dos cenários climáticos utilizados foram apresentados no Capítulo 3.

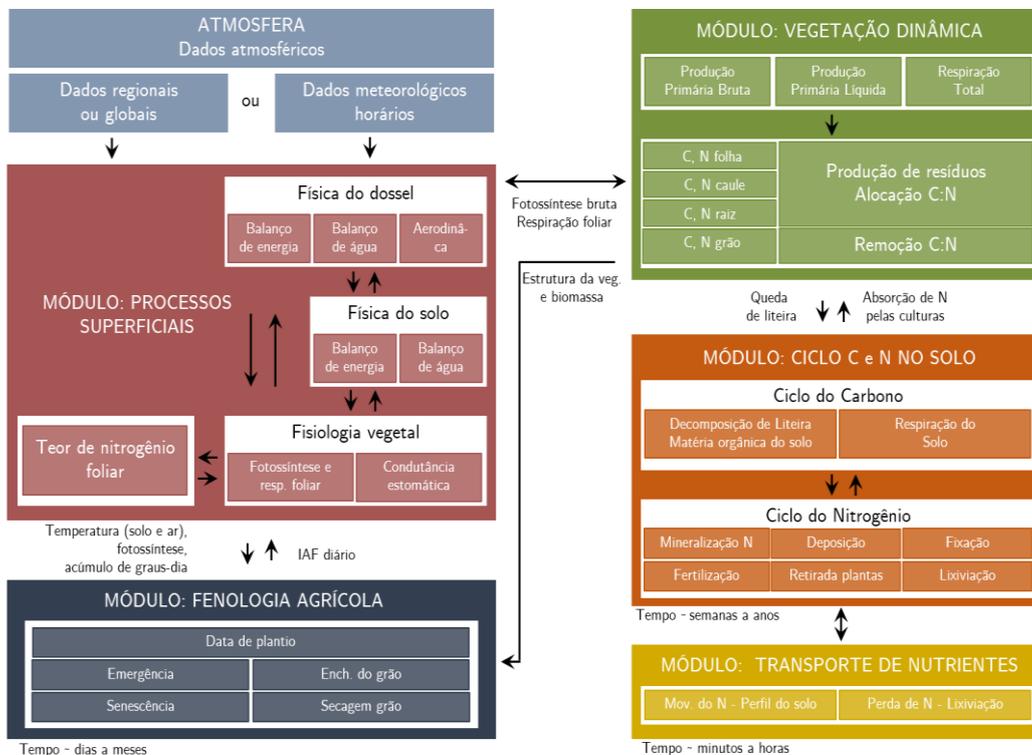
5.2.1. Descrição do Modelo de Superfície INLAND

O INLAND (*Integrated Model of Land Surface Process*), versão 2.0, é derivado do Modelo IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000), Agro-IBIS (KUCHARIK; BRYE, 2003; KUCHARIK; TWINE, 2007; TWINE; KUCHARIK, 2008) e dos desenvolvimentos de Cuadra et al. (2012). O foco principal do INLAND é o de simular os principais processos de interação biosfera-atmosfera da América do Sul e por isso nos últimos anos vem sendo utilizado, adaptado, implementado e calibrado em alguns estudos realizados para representar os processos superficiais brasileiros (BENEZOLI, 2014; TOURIGNY, 2014; PIRES, 2015; SILVA, 2015; CAVERO, 2016; JOÃO, 2016; LYRA et al., 2016; MEDEIROS, 2016; REZENDE et al., 2016a, 2016b).

O INLAND considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em respostas as condições ambientais sendo, portanto, classificado como Modelo de Vegetação Dinâmica Global. Este modelo pode ser usado em versão não-acoplada a modelos globais ou regionais (*offline*) e permite o uso em modo *grid*, em escalas globais ou regionais, ou em modo *single point*, ou seja, em escala pontual (DELIRE; FOLEY, 1999). O modelo representa os processos da superfície terrestre, os quais estão relacionados à energia, água, solo e atmosfera. Inclui representações da fisiologia do dossel, através da fotossíntese e condutância estomática, fenologia, competição entre plantas e balanço de carbono terrestre, tais como produção primária líquida, alocação de carbono, carbono no solo e decomposição de matéria orgânica (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000; KUCHARIK; BRYE, 2003).

O modelo segue uma estrutura hierárquica conceitual, dividida em módulos (submodelos) que operam em escalas temporais variando de uma hora a um ano, favorecendo o acoplamento entre os processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos (Figura 5.1). Além da vegetação natural, a estrutura de modelagem também permite a simulação de ecossistemas agrícolas. Com a inclusão do cafeeiro arábica, o INLAND tem no total 17 Tipos Funcionais de Plantas (TFP): 12 naturais e cinco culturas agrícolas: soja (KUCHARIK; TWINE, 2007), milho (KUCHARIK; TWINE, 2007), trigo (HANAN et al., 2005), cana-de-açúcar (CUADRA et al., 2012) e café arábica – através dos desenvolvimentos desta tese. As principais informações fornecidas pelo modelo são: produtividade da cultura, produção de matéria seca - folhas, caule, raízes e grãos/frutos, Índice de Área Foliar (IAF) diário, crescimento radicular da planta, variáveis relacionadas ao ciclo de carbono e nitrogênio, evapotranspiração, água no solo e fluxo de CO₂ do solo (KUCHARIK; BRYE, 2003).

Figura 5.1 - Esquema do modelo INLAND. As setas indicam os fluxos de informações entre os módulos.



Fonte: Adaptado de Kucharik e Brye (2003).

No módulo de superfície, o INLAND representa duas camadas de vegetação (dossel inferior - gramíneas e arbustos e dossel superior – árvores) e seis camadas de solo para vegetação natural. Quando ativado o modo agrícola o modelo considera uma camada de vegetação (dossel inferior) e onze camadas de solo. Neste módulo de superfície, o modelo simula os balanços de energia, água, dióxido de carbono e momentum. No módulo de fenologia é descrito o comportamento dos TFP em relação às condições climáticas sazonais baseado no crescimento medido por graus-dia ou delimitação dos estágios fenológicos quando ativado o modo agrícola. No módulo do balanço do carbono são consideradas a soma da fotossíntese bruta, a respiração de manutenção e a respiração de crescimento, para representar o balanço anual para cada TFP. No módulo de vegetação dinâmica é representada a mudança da cobertura da vegetação em dependência com o tempo, as quais são resultantes de modificações da produtividade primária líquida, fixação de carbono, crescimento da biomassa, mortalidade e volume de biomassa. A seguir serão brevemente descritos a fisiologia, fenologia e balanço de carbono do modelo.

5.2.1.1. Fisiologia do dossel

As transferências de vapor d'água e dióxido de carbono entre a vegetação e a atmosfera são controladas pelos processos fisiológicos que governam a fotossíntese e a condutância estomática. O INLAND utiliza um tratamento semi-mecânico para a fotossíntese (FARQUHAR et al., 1980; FARQUHAR e SHARKEY, 1982) e um tratamento empírico para a condutância estomática (BALL et al., 1987). Nestes tratamentos são considerados que a fotossíntese é função da luz absorvida, da temperatura da folha, da concentração de CO₂ na folha e da capacidade da enzima Rubisco, enquanto que a condutância estomática é função da taxa fotossintética e das concentrações de CO₂ e de vapor d'água (FOLEY, et al., 1996).

A fotossíntese em plantas C₃, como no caso do cafeeiro, é representada como o mínimo de três limitações na capacidade de fixar carbono. Desse modo, a taxa de fotossíntese bruta A_g (mol CO₂ m⁻² s⁻¹) por unidade foliar é expressa por:

$$A_g \approx \min(J_e, J_c, J_s) \quad (5.1)$$

Em que: J_e é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz; J_c é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela RuBisCO (Ribulose-1,5-Bisfosfato Carboxilase Oxigenase); J_s é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela alta concentração intercelular de CO_2 e elevada irradiância.

A limitação da fotossíntese pela luz (J_e) é dada por:

$$J_e = \alpha_3 Q_p \cdot \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i - 2\Gamma^*} \quad (5.2)$$

Em que: Q_p é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida; α_3 é a eficiência quântica intrínseca no sequestro de CO_2 ; C_i é a concentração intercelular de CO_2 ; Γ^* é o ponto de compensação para a assimilação bruta de CO_2 ($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), ou seja, o ponto em que a taxa fotossintética ultrapassa a taxa de respiração, dado por: $\Gamma^* = [\text{O}_2]/2\tau$. Em que $[\text{O}_2]$ é a concentração de oxigênio atmosférico ($0,209 \text{ mol mol}^{-1}$) e τ é a relação entre os parâmetros cinéticos que descrevem o particionamento da atividade da enzima para a função de carboxilase e oxigenase.

A limitação da assimilação de CO_2 pela enzima Rubisco é dada por:

$$J_c = \frac{V_m (c_i - \Gamma^*)}{c_i + K_c \left(1 + \frac{[\text{O}_2]}{K_o} \right)} \quad (5.3)$$

Em que: V_m é a capacidade máxima da enzima Rubisco; O_2 é a concentração de oxigênio na atmosfera; K_o e K_c são constantes de Michaelis -Menten, a primeira para inibir o oxigênio e a segunda para fixar o CO_2 , respectivamente. A capacidade da enzima Rubisco é dado por: $V_m = V_{\text{máx}} \cdot \omega(T) \cdot \omega(S)$, onde $V_{\text{máx}}$ é a capacidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco (parâmetro de entrada), também chamada na literatura como V_{cmax} ; $\omega(T)$ é a função de estresse devido a temperatura e $\omega(S)$ é função de estresse devido a umidade do solo. O estresse de umidade é um fator de escala que é calculado com base na disponibilidade de água no solo e na zona de enraizamento. Seu valor varia de 0 (tensão máxima) a 1 (sem estresse).

A taxa de assimilação de CO₂ limitada pela alta concentração intercelular de CO₂ e elevada irradiância é dado por:

$$J_s = 3T \left(1 - \frac{\Gamma_*}{C_i}\right) + \frac{J_p \Gamma_*}{C_i} \quad (5.4)$$

Em que T é a taxa de utilização da triose fosfato (T=V_m/8.2) e J_p é definido por:

$$\theta J_p^2 - J_p(J_e + J_c) + J_e J_c = 0 \quad (5.5)$$

Em que θ é uma constante empírica que rege a transição entre as três taxas potenciais de fotossíntese.

A condutância estomática é dada por:

$$g_s = m_0 \frac{A_n h_a}{c_s} + b \quad (5.6)$$

Em que: m₀ é o coeficiente relacionado à condutância estomática; A_n é a assimilação líquida de CO₂ e é dado por A_n= A_g - R_d, onde R_d é a respiração de manutenção (R_d = ζ.V_{máx}; ζ=custo de respiração da atividade Rubisco e V_{máx}=capacidade máxima da enzima Rubisco); h_a é a umidade relativa do ar; b é o intercepto da relação linear; c_s é a concentração de CO₂ na camada limite foliar.

5.2.1.2. Fenologia

Os estádios fenológicos de crescimento e desenvolvimento da planta são baseados em Graus-Dia de Desenvolvimento (GDD), de acordo com a equação abaixo:

$$GDD = \sum (T_{Média} - T_{Base}) \quad (5.7)$$

Em que: GDD são os graus-dia acumulados, T_{Média} é a temperatura média diária e T_{Base} é temperatura base da cultura. Com o GDD é pressuposto que a taxa de desenvolvimento de uma espécie vegetal está associada à disponibilidade de energia do meio, a qual é representada pela temperatura do ar. Portanto, assume

uma temperatura basal inferior (T_{Base}), delimitando que valores abaixo, a planta não se desenvolve ou se o fizer será a taxas reduzidas (PEREIRA et al. 2002).

O modelo particiona a matéria seca assimilada aos diferentes reservatórios de carbono (folha, caule, raiz e grão/fruto) de acordo com o estágio fenológico. A expansão foliar, dada pelo IAF, é simulada pelo produto entre o carbono acumulado no tecido foliar e a área específica da folha (SLA - *Specific Leaf Area*) usando um passo de tempo diário. Os estádios são definidos como graus-dia total necessários para atingir o início de cada fase de desenvolvimento. Para as culturas agrícolas o modelo define três estádios; em geral, o primeiro estágio ocorre entre o plantio e a emergência de folhas, o segundo estágio ocorre entre a emergência da folha e o início do enchimento do grão e o terceiro abrange do enchimento do grão até a maturidade fisiológica (KUCHARIK; BRYE, 2003). No INLAND, a quantidade de GDD necessária para a cultura atingir a maturação fisiológica é um parâmetro de entrada.

5.2.1.3. Balanço de carbono

O balanço anual de carbono para cada TFP e para as culturas agrícolas é calculado pela soma dos fluxos horários de carbono - fotossíntese bruta e os termos da respiração de manutenção.

A produtividade primária bruta (GPP), integrada ao longo do ano, é dada por:

$$GPP_i = \int A_{g,i} dt \quad (5.8)$$

E a produtividade primária líquida é dada por:

$$NPP_i = (1 - \eta) \int (A_{g,i} - R_{leaf,i} - R_{stem,i} - R_{root,i}) dt \quad (5.9)$$

Em que: i é cada TFP ou cultura agrícola; A_g é a assimilação de CO_2 bruta; η é fração de carbono perdida na construção do material vegetal devido a respiração ($\eta=0.33$).

A representação de cada TFP ou cultura agrícola é determinada pelo carbono nos reservatórios de biomassa: folhas, tecidos condutores - predominantemente caules, raízes finas e grãos.

$$\frac{\partial C_{i,j}}{\partial t} = a_{i,j}NPP_i - \frac{C_{i,j}}{\tau_{i,j}} \quad (5.10)$$

Em que, j é cada reservatório de biomassa, $a_{i,j}$ é fração de NPP anual alocado em cada reservatório, $\tau_{i,j}$ é o tempo de residência do carbono em cada reservatório, ou seja, representa a perda de biomassa pela mortalidade e volume de tecidos.

É importante destacar que para a cana-de-açúcar, Cuadra et al. (2012) implementaram outro esquema para a alocação de carbono. Os autores se basearam em análises dos modelos APSIM-*Surgacane* (KEATING et al., 1999) e CANEGRO (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002; SINGELS et al., 2005). No caso do cafeeiro, o modelo seguiu o esquema de alocação de carbono comum as culturas agrícolas C3. A produtividade do cafeeiro, assim como algumas outras culturas pré-existentes no modelo, é estimada pela porcentagem de matéria seca alocada para o fruto, que corresponde em termos de cafeicultura como café em estado de “coco” (TOSELLO, 1951).

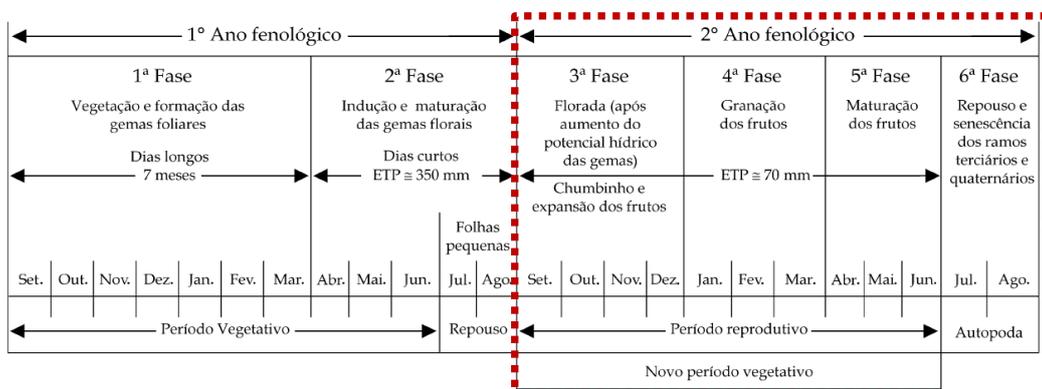
5.2.1.4. Estratégia de inserção do cafeeiro no modelo INLAND

Os desenvolvimentos relacionados a inclusão do cafeeiro foram realizados na versão 2.0 (*offline*) disponibilizada pelo Grupo de Interação Biosfera-Atmosfera do Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST-INPE). A estratégia de implementação consistiu da inserção dos parâmetros físicos e fisiológicos da planta da espécie *Coffea arabica* L., adaptação dos estádios fenológicos e do manejo da cultura, de acordo com dados disponíveis na literatura e da área de estudo, além de singularidades da cultura, tal como a bienalidade produtiva, seguindo a lógica e os módulos das culturas pré-existentes. É importante destacar que todas as alterações e implementações foram realizadas com base em características gerais da espécie *Coffea arabica* L., sendo considerado, portanto,

parâmetros de diferentes cultivares, tais como as cultivares Mundo Novo e Catuaí. Nesta primeira versão do INLAND-*coffee* todos os esforços foram direcionados para que o modelo conseguisse representar e capturar os valores médios da produtividade e a variabilidade interanual em resposta ao clima e a bienalidade da cultura na mesorregião SSMG. A seguir são apresentadas algumas das principais adaptações e inclusões realizadas no modelo, além da descrição de alguns parâmetros importantes na simulação da produtividade cafeeira.

Diferentemente da maioria das plantas que emitem as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico, o cafeeiro arábica leva dois anos para completar seu ciclo fenológico (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Camargo e Camargo (2001) com intuito de facilitar e racionalizar as pesquisas, esquematizaram o ciclo fenológico do cafeeiro arábica para as condições climáticas tropicais do Brasil, como apresentado na Figura 5.2. Para esse estudo, este esquema foi adotado na implementação do cafeeiro, no entanto, foi considerando apenas o segundo ano fenológico, ou seja, o período reprodutivo. Neste período ocorrem a floração, a granação e a maturação dos frutos, sendo finalizado com a senescência, a morte dos ramos plagiotrópicos terminais e a auto – poda, iniciando geralmente em setembro e indo até junho e julho do próximo ano (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

Figura 5.2 – Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil, com destaque do subperíodo de floração-maturação considerado na implementação da cultura no Modelo INLAND.



Fonte: Adaptado de Camargo; Camargo (2001).

No INLAND, os estádios de crescimento das culturas são simulados de acordo com o GDD e passados através de parâmetros de controle climático e fenológico. A ocorrência de cada estágio varia de acordo com as frações do GDD total necessário para atingir a maturidade fisiológica. A ocorrência da maturação do fruto é prescrita através dos parâmetros *hybgdd* e *mxmat*, que correspondem, respectivamente, ao total máximo de GDD necessário para maturidade fisiológica ocorrer e ao número máximo de dias permitidos após o plantio e antes que a maturidade fisiológica seja atingida. Quando satisfeito algum destes parâmetros, o modelo finaliza o ciclo da cultura. No caso do cafeeiro, o *mxmat* e o *hybgdd* foram ajustados para valores do subperíodo de floração-maturação do fruto. De acordo com Nunes et al. (2010), o cafeeiro arábica necessita de acúmulos térmicos entre 2733 a 3046 graus-dia, a uma temperatura base de 10,5°C (PEZZOPANE et al., 2008) para completar o estágio de floração-maturação. Ainda segundo os autores, este estágio leva entre 196 e 242 dias para ser completado (NUNES et al., 2010).

O início do florescimento foi representado através dos parâmetros *pcm* e *pcd*, que correspondem ao mês de calendário de plantio e o dia de calendário de plantio respectivamente, ajustados para início de setembro que corresponde, de acordo com o esquema proposto por Camargo e Camargo (2001), ao mês de início do florescimento do cafeeiro no SEB. Foram ajustados também os parâmetros *ptemp* e *pmin_{temp}*, que correspondem às médias diárias da temperatura média e mínima do ar dez dias antes do início do florescimento, ajustados de acordo com valores climatológicos do SEB. Além de parâmetros de controles climáticos e fenológicos da planta, o INLAND também considera aplicação de fertilizantes nitrogenados e irrigação. A irrigação não foi considerada nas simulações do cafeeiro. A fertilização foi aplicada a cada data de início do florescimento e mantida fixa ao longo de toda integração do Modelo em uma quantidade de 220 kg/ha, conforme taxas a escala de campo (SOUZA, 2016)¹. Uma particularidade do cafeeiro que tem grande influência na produtividade, portanto necessária na implementação da cultura,

¹Barros, R. S. (Engenheiro agrônomo – RTV Adama Brasil. Comunicação pessoal, 2016)

constitui-se da bienalidade produtiva (MENDONÇA et al., 2011). A bienalidade é uma característica conatural da cultura, sendo considerada como o fenômeno da alternância entre alta e baixa produções (MENDONÇA et al., 2011; SILVA; REIS 2013). A alternância na produção ocorre devido às funções vegetativas e reprodutivas acontecerem simultaneamente no mesmo ramo. Em vista disto, e também pela planta não conseguir produzir reservas suficientes para a frutificação e crescimento, num ano as reservas são direcionadas para os frutos, o que aumenta a produtividade e no outro são direcionadas para o crescimento dos ramos plagiotrópicos, contribuindo para a redução da produção de frutos (MEDONÇA et al, 2011). No INLAND, a bienalidade produtiva foi representada através da inclusão do parâmetro *idxbiecfe*, sendo ativada ou não através do parâmetro *iyrObiecfe*. O parâmetro *iyrObiecfe* varia de 1 a 3, sendo igual a 1 quando não se pretende aplicar a bienalidade da produção, 2 quando a simulação inicia em ano de safra alta e 3 quando inicia em ano de safra baixa. Quando ativado 2 ou 3, a produtividade final do cafeeiro sofre uma penalização, intercalada entre safras alta - baixa ou baixa - alta, dependendo da inicialização do parâmetro *iyrObiecfe*. O parâmetro *idxbiecfe* foi prescrito de acordo com o valor proposto por Lunz (2006) que atribui uma redução de 25% na produtividade em anos de safra baixa.

Outros parâmetros modificados para representar o cafeeiro arábica compreendem o SLA, V_{max} , eficiência quântica intrínseca, altura máxima do dossel, IAF e alocação de carbono para folha, caule e raiz. Desta listagem, V_{max} é um dos mais importantes na simulação da produtividade, pois descrevem com precisão a capacidade fotossintética da cultura (FARQUHAR et al., 1980). No INLAND, V_{max} é atenuado por um fator de estresse para reduzir a produtividade da planta sob condições de estresse hídrico no solo e estresse de temperatura (KUCHARIK; BRYE, 2003), no entanto o valor inicial é fixo. Todavia, alguns estudos têm ressaltado a importância da variação de alguns parâmetros iniciais, principalmente o V_{max} , em Modelos de Vegetação Dinâmica, quando se pretende simular diferentes cenários de concentração de CO₂ (SMITH; DUKES, 2012; TWINE et al., 2013; CAVERO, 2016). Isso ocorre pelo fato de que algumas espécies apresentam aclimação fisiológica, podendo assim produzir resultados superestimados dos efeitos benéficos da

fertilização do CO₂, especialmente em culturas C3. A aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂ atmosférico consiste em uma série de alterações metabólicas em diferentes níveis de organização, desde molecular e bioquímico até anatômico e morfológico (WALTER et al., 2015). No entanto, estudos para o cafeeiro arábica têm mostrado que a espécie não apresenta aclimação negativa (*downregulation*) em ambiente mais enriquecido com dióxido de carbono, sugerindo que o cafeeiro pode sustentar taxas fotossintéticas relativamente altas em cenário de aumento de CO₂ atmosférico (RAMALHO et al., 2013; GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016). Diante do exposto, não foi necessário variar o V_{max} ao longo das simulações, no entanto, devido a sua importância, foi extensivamente calibrado a partir de valores disponíveis na literatura (MARTINS et al., 2014b).

A listagem e a descrição dos principais parâmetros necessários na implementação do cafeeiro arábica seguem na Tabela 5.1. Os parâmetros que apresentaram alta sensibilidade nas simulações da produtividade do cafeeiro estão marcados com asterisco. É importante enfatizar que uma boa parte destes parâmetros foi disponibilizada através de comunicação pessoal com expertises em ecofisiologia do cafeeiro, devido à falta de referências na literatura. Neste sentido, houve grande colaboração do Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e do Dr. Samuel Cordeiro Vitor Martins da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Em termos técnicos, foi realizada inicialmente a varredura de todo o código do modelo, com estudo detalhado da rotina principal (*main_offline*), das sub-rotinas e módulos, com intuito de evitar erros numéricos na inclusão da cultura. Nos trechos de implementação foram criadas *tags*, as quais foram padronizadas para “PTavares (2016)”, com intuito de facilitar a execução da implementação e de contribuir em possíveis desenvolvimentos futuros, tais como: inclusão de uma nova espécie de café (ex.: *Coffea canephora*), inclusão de novas culturas agrícolas e/ou teste de sensibilidade do modelo. As sub-rotinas, módulos, arquivos de parâmetros, arquivos de configuração e arquivos de ambiente onde houveram alterações para inclusão e/ou adaptação para o cafeeiro arábica e ajustes para rodar o modelo em alta resolução horizontal seguem no Apêndice A.

Tabela 5.1 - Descrição de alguns parâmetros usados na implementação do cafeeiro arábica no modelo INLAND.

Nome	Descrição	Valor	Fonte
Crescimento da cultura – Propriedades fisiológicas			
drought	Sensibilidade das culturas a seca	1,2	Barbosa (2016)
baset	Temperatura base (K) usada para soma diária do GDD	283,66	Pezzopane et al. (2008)
tkill	Temperatura (K) na qual as culturas são danificadas devido ao congelamento	270,16	Camargo (1966)
Expansão da área foliar/senescência e alocação de carbono			
laimx	Máximo IAF permitido	4,6	Martins et al. (2014b)
aleaff	Alocação de carbono para as folhas no final da estação de crescimento	0,15	Barbosa (2016) ²
astemf	Alocação de carbono para o caule no final da estação de crescimento	0,12	Barbosa (2016) ²
Controle fenológico e GDD			
hybgdd*	Máximo GDD requerido para a maturidade fisiológica	3046	Nunes et al. (2010)
mxmat*	Número máximo de dias permitidos após o início de florescimento antes de atingir a maturidade fisiológica	242	Nunes et al. (2010)
grnfill	Fração anual de GDD necessária para início do enchimento do grão/fruto	0,625	Ajustado
Outros parâmetros da cultura			
ztopmx	Altura máxima da planta (m)	3	Barbosa (2016) ²
Resíduo da cultura e parâmetros do grão e nitrogênio			
cgrain*	Fração de matéria seca no grão/fruto que é carbono	0,40	Barbosa (2016) ²
convfact	Fator de conversão de kg/m ² para kg/ha	1x10 ⁴	Padrão
cfrac	Fração de matéria seca que é carbono	0,40	Barbosa (2016) ²
fnlfmx	Quantidade máxima de N permitida na folha no final da estação de crescimento	0,06	Barbosa (2016) ²
fngrmx	Quantidade máxima de N permitida no fruto/grão no final da estação de crescimento	0,06	Barbosa (2016) ²
sratio	Razão de alocação de N caule: folha	0,10	Barbosa (2016) ²
rratio	Razão de alocação de N raiz: folha	0,10	Barbosa (2016) ²
fnopt	Teor mínimo de nitrogênio foliar que não experimenta estresse de N	0,03	Barbosa (2016) ²
Parâmetros específicos de fisiologia C3			
alpha3cfe*	Eficiência quântica intrínseca do cafeeiro	0,06	Borges (2009)
Outros parâmetros da vegetação			
vmax_pft*	Velocidade máxima da enzima Rubisco a 15°C (mol[CO ₂]/m ² s ⁻¹)	25x10 ⁻⁶	Martins et al. (2014b)/Ajustado
specla*	Área específica da folha (m ² kg ⁻¹)	12	Campostrini (1994)
tauleaf	Constante de tempo de retorno da biomassa foliar (anos)	1	Barbosa (2016) ²
tauroot	Constante de tempo de retorno da biomassa de raízes finas (dias)	365	Barbosa (2016) ²
Parâmetros criados para o cafeeiro			
ldxbiecf*	Fator de bienalidade para o cafeeiro	0,75	Lunz (2006)
iyrobiecfe	Rastreador para aplicar bienalidade da cultura: 1 – Não aplica a bienalidade, 2 – Inicia a simulação com safra alta e 3 – Inicia a simulação com safra baixa	1, 2 ou 3	Criado

*Parâmetros que apresentaram alta sensibilidade nas simulações da produtividade do cafeeiro

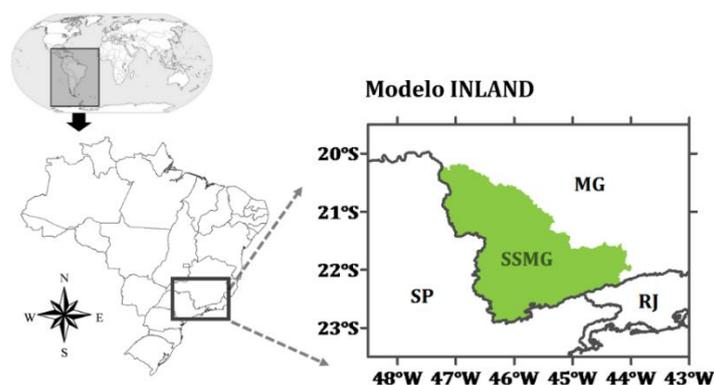
Fonte: Produção da autora.

² Barbosa, J. P. R. A. (Especialista em Ecofisiologia do café – Universidade Federal de Lavras. Comunicação pessoal, 2016)

5.2.2. Configuração do INLAND-coffee e dados de entrada

Testes com o INLAND-coffee foram inicialmente realizados na resolução nativa do modelo, ou seja, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, adotando o mesmo domínio das simulações do modelo Eta-HadGEM. Estes testes foram realizados apenas para ajustes iniciais do INLAND-coffee. Nas simulações numéricas usadas nesta tese, o INLAND foi configurado para cobrir a mesorregião SSMG com resolução horizontal de $0.05 \times 0.05^\circ$, numa grade de 111 por 81 pontos, com passo de tempo de 7200 s (Figura 5.3). Adotou-se a resolução de 5 km de grade regular para manter o detalhamento das condições atmosféricas provenientes das simulações do modelo Eta-HadGEM. Esta resolução também favorece um melhor refinamento da estimativa espacial da produtividade.

Figura 5.3 – Área de atuação do modelo INLAND, com destaque para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG).



Fonte: Produção da autora.

O modelo foi alimentado pelas simulações do clima presente e das projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 gerados pelo modelo Eta-HadGEM em 5 km. Descrições do modelo Eta-HadGEM e detalhamentos dos cenários RCP foram apresentados no Capítulo 3. A simulação da produtividade no período *baseline* (clima presente) teve a duração 46 anos de integração, compreendidos entre os anos de 1960 a 2005. Estas simulações foram usadas como referência para avaliar se a produtividade gerada com INLAND-coffee apresentaria resultados satisfatórios. Esta avaliação foi realizada através da comparação com a produtividade observada da mesorregião SSMG, obtida através do site do IBGE.

Após a validação da produtividade simulada no clima presente foram realizadas projeções da produtividade com integrações longas do período de 2006 a 2099, dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 gerados pelo modelo Eta-HadGEM em 5 km. Nas simulações da produtividade em climas futuros foram considerados os valores dos incrementos anuais do CO₂ atmosférico de cada cenário RCP e CO₂ fixo de 353 ppm a partir do ano de 1990. As projeções do INLAND-*coffee* mantendo o CO₂ fixo foram realizadas para avaliar, em contrapartida, a resposta da produtividade sem incremento do gás carbônico.

No INLAND são usadas como condições iniciais, além das forçantes atmosféricas, as condições de superfície, especificamente: composição do solo – porcentagem de areia e argila em seis camadas, máscara continente-corpos d’água, topografia e tipos potenciais de cobertura da superfície. Devido ao aumento da resolução espacial do INLAND, todos os dados usados como condições de superfície foram atualizados, com intuito de prover um conjunto com resolução mais refinada. Portanto, foram usados os seguintes dados:

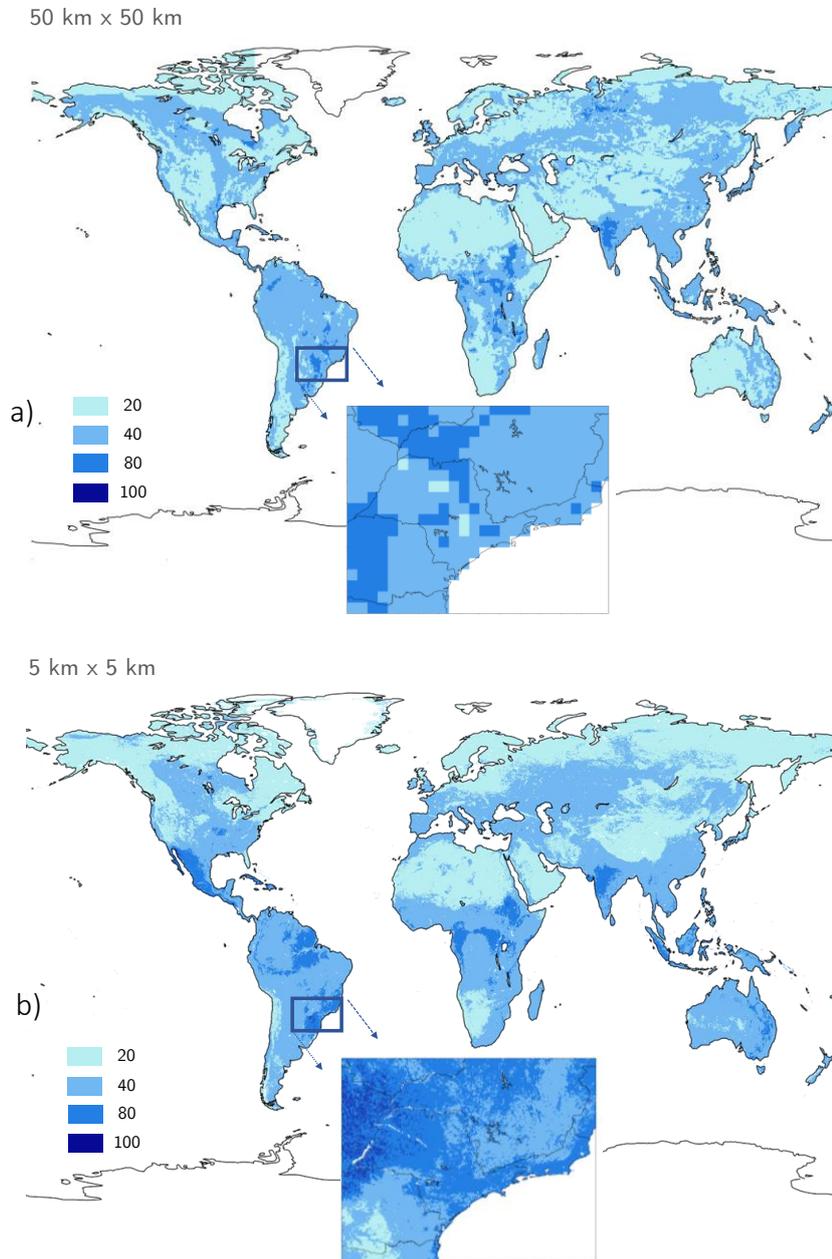
- i) Porcentagem de areia e argila do *International Soil Reference & Information Centre* (ISRIC), disponibilizados na resolução espacial de 1 km (HENGL et al., 2014);
- ii) Mapa de uso e cobertura da terra proveniente do produto MCD12Q1 do MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) (CHANNAN et al, 2014), disponibilizados na resolução espacial de aproximadamente 400 m para o esquema de classificação proposto pelo *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) (ORNL DAAC, 2016)
- iii) Dados topográficos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), versão 4, com 90 m de resolução espacial, obtidos através do *Consultative Group on International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI), disponibilizados após interpolação e correção de vazios na resolução espacial de 1 km (JARVIS, 2008).

- iv) Máscara continente- corpos d'água da *European Space Agency* -projeto *Climate Change Initiative* (ESA-CCI), disponibilizada na resolução espacial de 300 m em: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>

Na execução do INLAND, todo o conjunto de dados tem que estar disposto na resolução horizontal que se pretende realizar as simulações, sendo assim, os dados mencionados acima, excetuando o mapa de uso e cobertura da terra, foram interpolados e preparados na resolução espacial de 5 km. Em relação ao mapa de uso e cobertura da terra a própria fonte dos dados possibilita o usuário trabalhar o dado na resolução espacial pretendida, portanto foi reamostrado, na resolução espacial também de 5 km, pelo método do vizinho mais próximo através da plataforma. Posteriormente, este mapa foi reclassificado para ser compatibilizado com as classes de vegetação utilizadas pelo INLAND. Todavia, é importante destacar que em simulações do INLAND para ecossistemas agrícolas, o mapa de uso e cobertura do solo é usado apenas para iniciar a integração, tendo em vista que o modelo pressupõe a existência da cultura agrícola selecionada, no caso o cafeeiro, em todo o domínio da simulação.

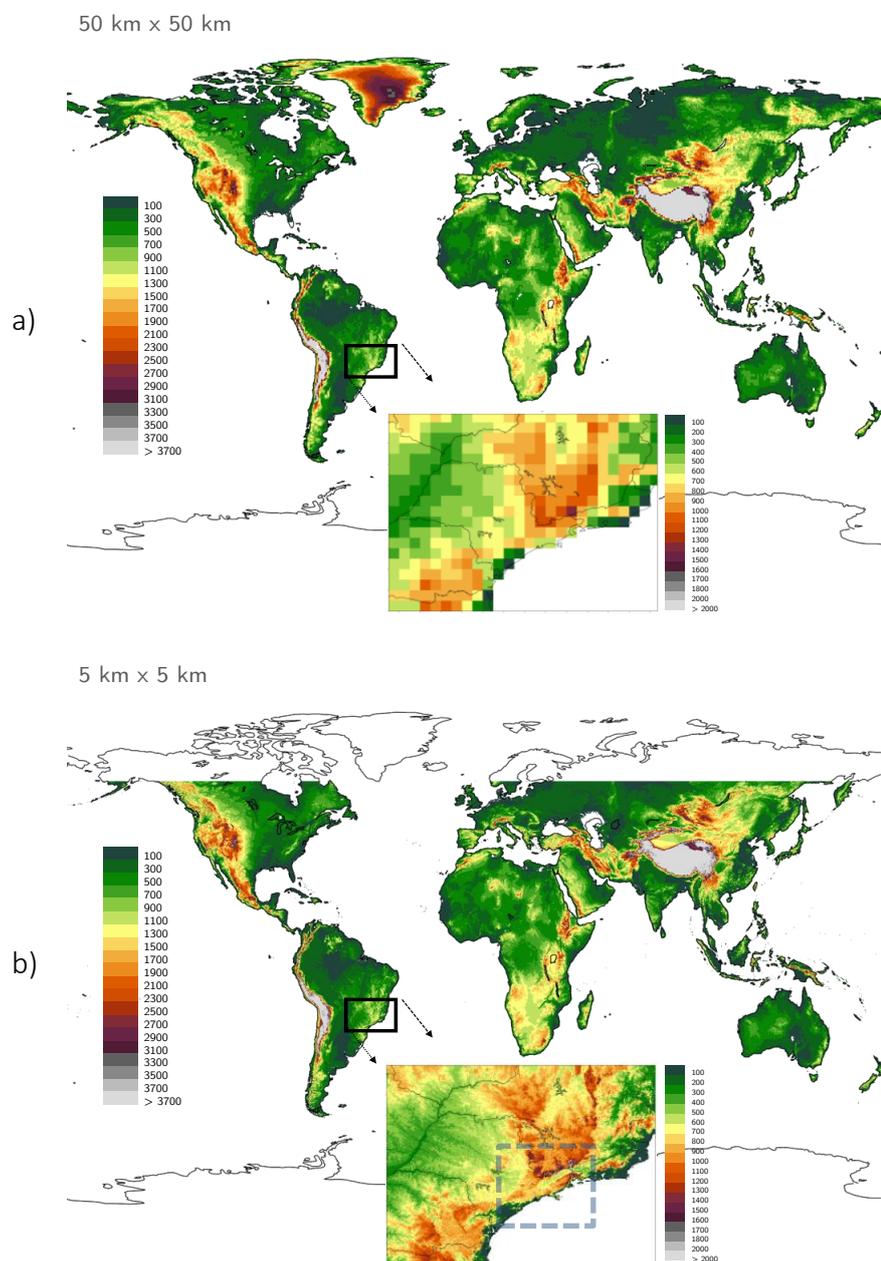
Exemplos dos dados disponibilizados pelo Grupo de Interação Biosfera-Atmosfera do CCST-INPE na resolução nativa do INLAND (50 km) e após a atualização do conjunto são mostrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. É notável o ganho de detalhamento da superfície, em especial a topografia que mostra distinção de regiões de serra e vale, como a Serras da Mantiqueira e do Mar, bem como o Vale do Paraíba, em destaque na Figura 5.5. O aumento da resolução do INLAND é um desenvolvimento introduzido ao próprio modelo, tendo em vista que nunca foi rodado em alta resolução horizontal como proposto nesse estudo. Todo o conjunto de dados, tanto as condições atmosféricas quanto as condições de superfície foram preparados para o formato de leitura do INLAND. Para as condições atmosféricas, os dados foram preparados em frequência diária, considerando o calendário gregoriano, das variáveis de temperatura média (°C), máxima e mínima do ar (°C), precipitação (mm/dia), umidade específica (g/kg), nebulosidade (%) e velocidade do vento (m/s).

Figura 5.4 – Mapa de propriedade do solo usado pelo modelo INLAND: porcentagem de argila na primeira camada de solo. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km.



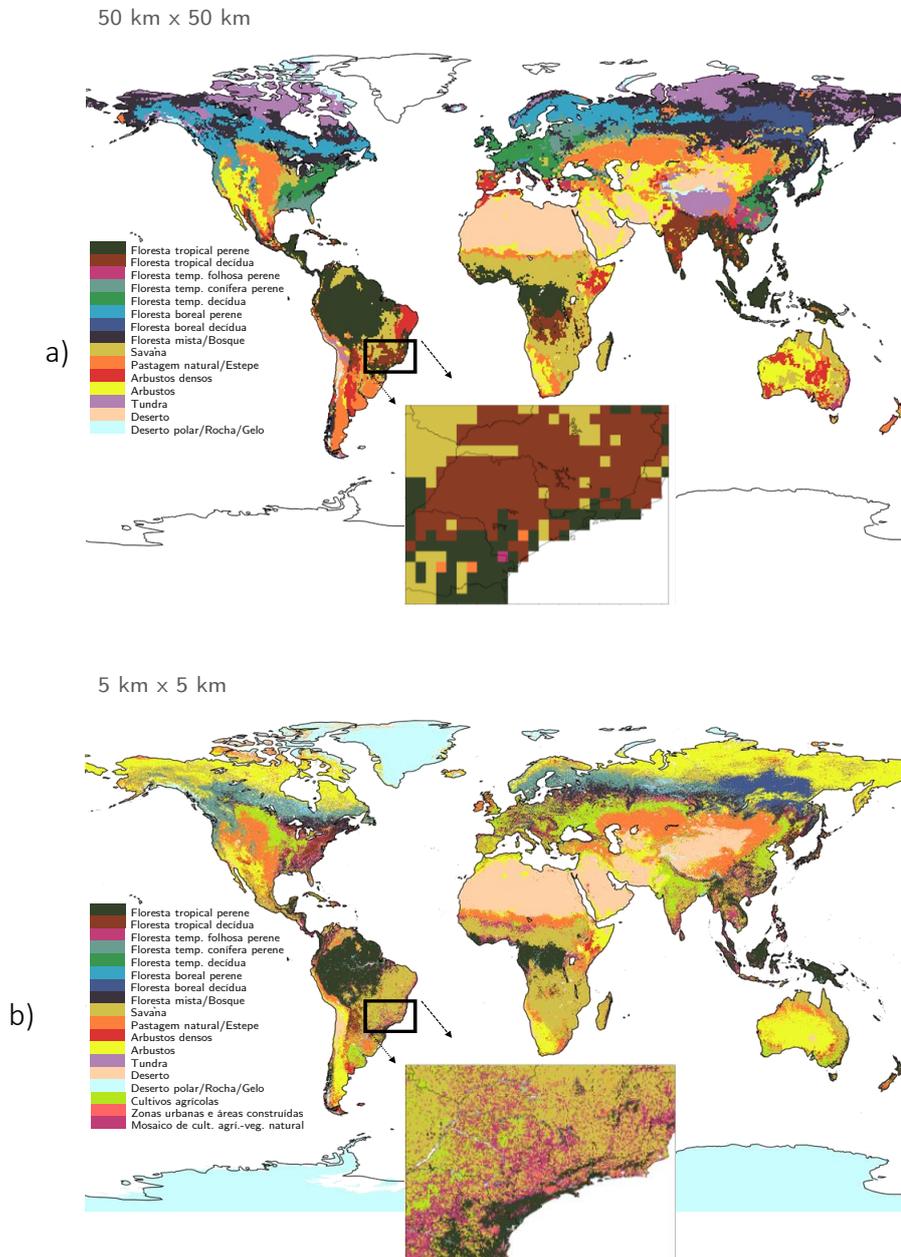
Fonte: a) Adaptado de Carter e Sholes et al. (2000) /*International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)*; b) Adaptado de Hengl et al. (2014) /*International Soil Reference & Information Centre (ISRIC)*.

Figura 5.5 – Mapas topográficos (m) usados pelo Modelo INLAND. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km



Fonte: a) Adaptado de *National Geophysical Data Center- National Oceanic and Atmosphere Administration (NGDC-NOAA) /ETOPO5*. b) Adaptado de *Jarvis et al. (2008) / Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) v4.1*

Figura 5.6 - Mapas de tipos de uso e cobertura da terra usados para inicialização do Modelo INLAND. a) dado disponibilizado pelo grupo de desenvolvimento do Modelo, na grade regular de 50 km x 50 km. b) dado usado nas simulações do Modelo em alta resolução espacial, grade regular de 5 km x 5 km.



Fonte: a) Adaptado de Ramankutty e Foley (1999); SAGE (2002) – vegetação potencial.
 b) Adaptado de Channan et al. (2014) / *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) produto MCD12Q1*.

5.3. Resultados

Os resultados estão divididos em três subseções. A primeira subseção apresenta a avaliação do modelo *INLAND-coffee* realizada através da comparação das simulações da produtividade com dados observados obtidos da região de estudo. Na segunda subseção é analisado o impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade média do cafeeiro na mesorregião SSMG, considerando os incrementos anuais do CO₂ atmosféricos dos cenários de concentração RCP4.5 e RCP8.5 e mantendo o CO₂ fixo de 353 ppm. Na terceira e última subseção são apresentadas as projeções da produtividade do cafeeiro em escala espacial e com detalhamentos microrregionais.

5.3.1. Avaliação do *INLAND-coffee*

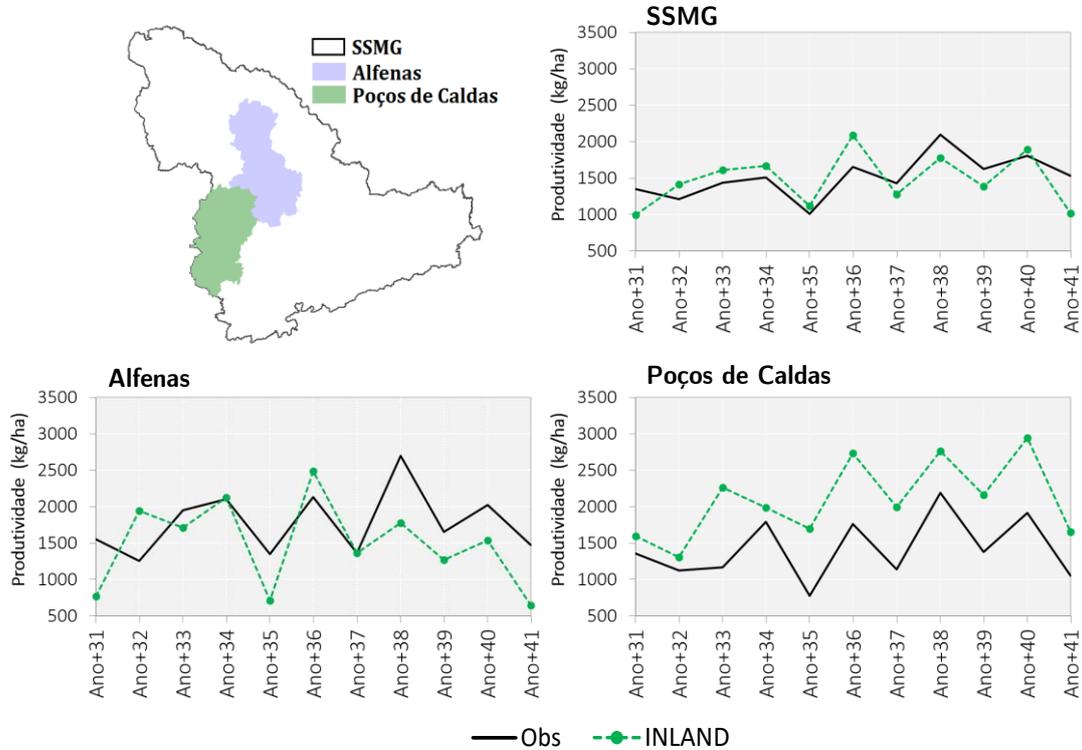
A simulação do *INLAND-coffee* foi validada com dados de produtividade (kg/ha) obtidos das informações de Produção Agrícola Municipal disponibilizadas pelo IBGE, através da plataforma SIDRA (Sistema IBGE de Recuperação Automática). Foram usados dados do período de 1991 a 2001 da mesorregião SSMG e suas respectivas microrregiões. Na avaliação, além dos valores anuais e médios do período, foram considerados também algumas métricas estatísticas, como o erro médio (BIAS), o erro absoluto médio (MAE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (*r*) de acordo com as equações 4.5 a 4.8 apresentadas no Capítulo 4.

Na Figura 5.7 estão apresentados os resultados da simulação da produtividade cafeeira (kg/ha) média da área da mesorregião SSMG e das microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas. As séries anuais das demais microrregiões do SSMG não foram apresentadas devido a inconsistências dos dados observados. Nestas simulações, o *INLAND* foi alimentado pelas condições atmosféricas do Eta-HadGEM em 5 km do período *baseline* atualizadas em escala de tempo diária. Foi considerado um passo de tempo de 7200 s (2 h) para um período de integração de 46 anos, iniciando em 1960 e finalizando em 2005.

A bienalidade do cafeeiro foi ajustada de acordo com os anos de safra alta e baixa da mesorregião SSMG.

Apesar do curto período de dados para avaliação, nota-se que o INLAND consegue simular a variabilidade interanual da produtividade na mesorregião SSMG em resposta a variabilidade climática e a bienalidade da cultura (Figura 5.7). O modelo também mostrou um desempenho razoável em simular as diferenças microrregionais, como mostrado nas microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas (Figura 5.7). Em Poços de Caldas, nota-se que o INLAND-*coffee* tende sistematicamente a superestimar a produtividade, no entanto, esse erro pode ser atribuído à resposta do modelo apenas ao estresse de temperatura e umidade do solo, mas sem outros fatores externos que podem afetar os rendimentos direta ou indiretamente. As superestimativas podem estar associadas também à limitação em considerar parâmetros de alta sensibilidade, tais como o $V_{máx}$, prescritos para todo o domínio da simulação. Como mencionado por Castanho et al. (2013), o uso de valores únicos para parâmetros biofísicos chave, tais como o $V_{máx}$, podem limitar a precisão da simulação da variabilidade espacial da produtividade. A estrutura de modelagem do INLAND permite uso de alguns parâmetros biofísicos heterogêneos, porém mapas com os parâmetros específicos para o cafeeiro ainda necessitam ser preparados.

Figura 5.7 - Produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) para a mesorregião do Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e as microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas. Dados observados e simulados pelo Modelo INLAND-coffee.



A produtividade corresponde aos valores médios da mesorregião e as microrregiões avaliadas. Os dados observados foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Nos gráficos, o eixo das abscissas Ano+31 corresponde ao trigésimo primeiro ano após a inicialização da rodada, Ano+32, ao trigésimo segundo ano e assim sucessivamente. O tempo de integração do modelo INLAND foi de 46 anos para o período de 1960 a 2005, considerando como condições atmosféricas as simulações do Modelo Eta-HadGEM 5 km.

Fonte: Produção da autora.

A Tabela 5.2 resume o erro médio (BIAS), erro médio absoluto (MAE), erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação (r). Nota-se que o INLAND-coffee apresenta um ótimo desempenho na simulação da produtividade na mesorregião SSMG, com subestimativa média de 37 kg/ha, o que corresponde aproximadamente um desvio percentual de apenas -2% em relação a produtividade observada. Este desvio é razoavelmente mais baixo do que os valores encontrados por Santos (2002) (-5,85%) para

a simulação da produtividade do cafeeiro arábica em Viçosa-MG. Os desvios percentuais do MAE e RMSE ficaram abaixo de 17 e 20%, respectivamente.

Nas microrregiões avaliadas, o modelo INLAND-*coffee* apresenta erros médios mais altos, com subestimativa de 292 kg/ha, em Alfenas, e superestimativas de 676 kg/ha em Poços de Caldas. Entretanto, apesar dos erros médios das microrregiões serem consideravelmente mais altos em relação ao erro médio da mesorregião SSMG, estes desvios estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura (324 – 762 kg/ha), como apresentado em Santos e Camargo (2006) para a simulação dos rendimentos do cafeeiro em localidades do estado de São Paulo. Em Poços de Caldas, apesar da tendência sistemática do modelo em superestimar a produtividade foi notado alto valor do coeficiente de correlação ($r=0,8$), evidenciando que o modelo captura a variabilidade interanual dos rendimentos da cultura.

Os resultados destas análises demonstram a potencialidade do uso do INLAND-*coffee* na simulação dos rendimentos do cafeeiro na área de estudo, tanto em escala mesorregional quanto microrregional, podendo assim ser usado para inferir as tendências da produtividade a longo prazo.

Tabela 5.2 – Produtividade média do cafeeiro arábica (kg/ha) observada (Obs.) e simulada pelo Modelo INLAND-*coffee*, para o período de 1991 a 2001, e os erros médios (BIAS), médios absolutos (MAE), raiz dos erros quadráticos médios (RMSE) e os coeficientes de correlação (r) entre as simulações e as observações para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e as microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas.

Região	Obs.	Simulada	BIAS	MAE	RMSE	r
SSMG	1512	1475	-37	249	282	0,6
Alfenas	1776	1484	-292	487	572	0,6
Poços de Caldas	1422	2098	676	676	751	0,8

Fonte: Produção da autora.

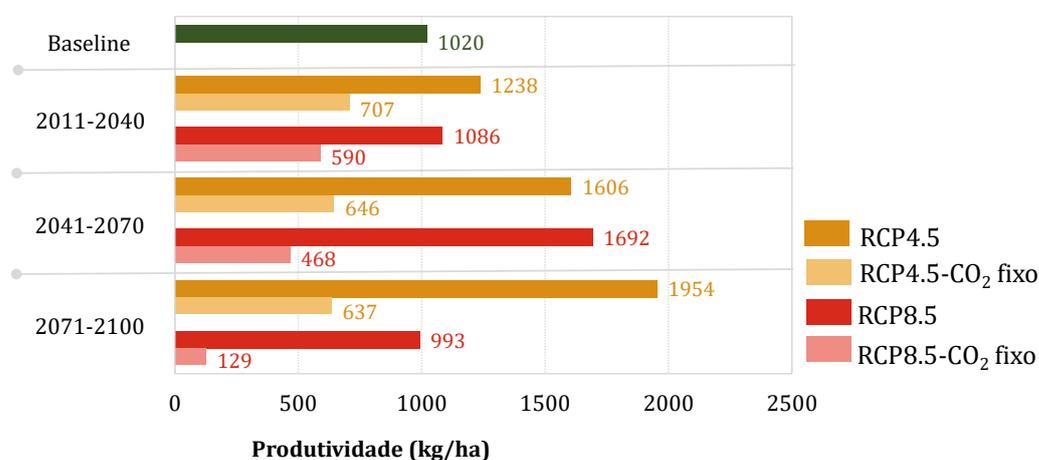
5.3.2. Respostas da produtividade ao incremento de CO₂ atmosférico

Um dos principais elementos a serem considerados na simulação da produtividade das culturas agrícolas em cenários climáticos futuros é o dióxido de carbono. Isso porque o incremento da concentração deste gás na atmosfera pode favorecer o aumento da produtividade em algumas culturas, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para o processo fotossintético (TAIZ; ZEIGER, 2004). A concentração atual do CO₂ atmosférico, ou seja, aproximadamente 405 ppm (NOAA, 2017), é insuficiente para saturar a enzima Rubisco, responsável pela carboxilação primária em plantas C3, como no caso do cafeeiro (TAIZ; ZEIGER, 2004). Todavia, é pressuposto que concentrações de CO₂ próximas de 1000 ppm passam a causar fitotoxicidade e quando acompanhadas de aumento da temperatura do ar podem anular o efeito de maior crescimento e produtividade das culturas, em razão do encurtamento do ciclo de desenvolvimento e do aumento da respiração (MORAES et al., 2011). Resultados experimentais de sistema FACE (GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016) têm mostrado que o cafeeiro arábica é claramente beneficiado em ambiente mais enriquecido com gás carbônico com concentração a 550 ppm, com aumento superior a 40% da taxa fotossintética, maior eficiência do uso da água e aumento do crescimento e da produtividade, em torno de 12 a 14%.

De fato, os resultados mostram que o enriquecimento de CO₂ atmosférico contribui significativamente para atenuar os efeitos negativos do aumento da temperatura do ar favorecendo consideravelmente para o aumento da produtividade, como verificado nas projeções do INLAND-*coffee* para mesorregião SSMG (Figura 5.8). Tais incrementos na produtividade foram da ordem de 21 e 57% em 2011-2040 e 2041-2070, respectivamente, podendo chegar a 91% no final do século XXI, quando considerado o cenário de concentrações da ordem de 600 ppm (cenário RCP4.5). Níveis mais altos de CO₂, aliados a aumentos mais significativos da temperatura do ar – acima de 5-6°C (figuras apresentadas na seção 4.3.2 e no Apêndice B), tendem a suprimir o efeito fertilizante do gás carbônico, como notado no cenário RCP8.5 no *timeslice* de 2071-2100, onde as taxas de CO₂, neste cenário, começam a ultrapassar 800 ppm.

Resultados distintos são mostrados para as projeções da produtividade cafeeira ao longo do século XXI sem o incremento do CO₂ atmosférico (Figura 5.8). Nestas simulações, considerando CO₂ fixo de 353 ppm após o ano de 1990, as projeções indicam reduções drásticas da produtividade na mesorregião SSMG, podendo reduzir em 87% (129 kg/ha) em relação ao valor registrado no período *baseline*, como mostrado no *timeslice* de 2071-2100 do cenário RCP8.5. No cenário RCP4.5 as reduções são menos acentuadas, no entanto, não menos significativas, sendo da ordem de 31, 37 e 38%, em 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente. Estes resultados, demonstram a grande importância de se incluir o aumento da concentração de CO₂ atmosférico nas projeções da produtividade cafeeira em cenários de mudanças climáticas futuros.

Figura 5.8 - Produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) simulada pelo Modelo INLAND-*coffee* para mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Média das simulações realizadas com CO₂ atmosférico fixo e considerando os incrementos anuais projetados pelo IPCC para cada cenário. Período *baseline* e cenários RCP4.5 e RCP8.5.



A produtividade corresponde à média de 30 anos para a SSMG. O período *baseline* refere-se a média dos anos 1961 a 1990. Nos *timeslices* futuros foram consideradas os incrementos anuais do CO₂ correspondente a cada cenário de concentração (RCP4.5 e RCP85) e o valor de 353 ppm nas rodadas com CO₂ fixo. Foram usadas como forçantes atmosféricas no modelo INLAND-*coffee* as simulações do modelo Eta-HadGEM em 5km.

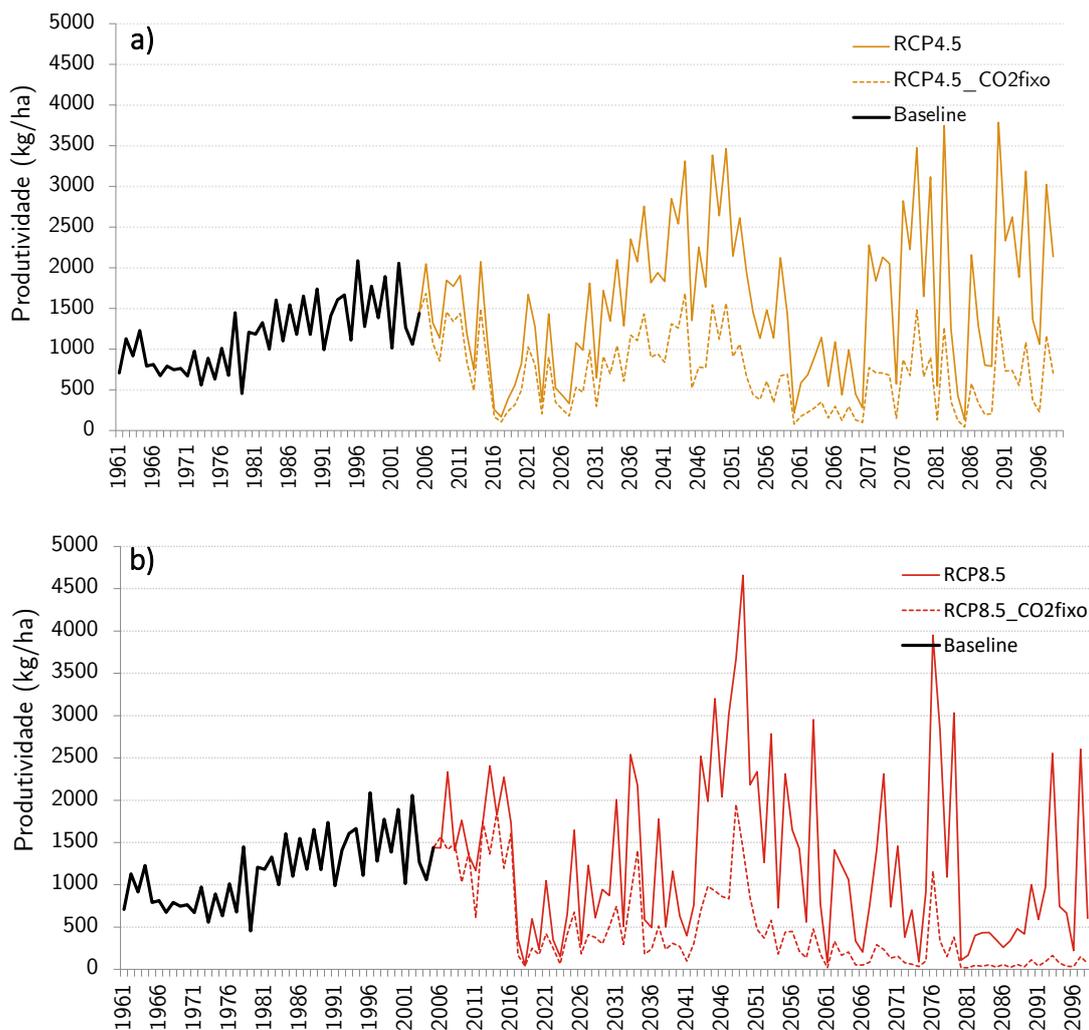
Fonte: Produção da autora.

Apesar dos aumentos médios da produtividade nos cenários projetados é importante avaliar como a mesma se comportará em termos interanuais. A Figura 5.9 mostra a produtividade anual na mesorregião SSMG em ambos cenários climáticos projetados, RCP4.5 e RCP8.5, com incremento do CO₂ atmosférico e com CO₂ fixo. Nota-se que as projeções da produtividade que incluem o aumento do CO₂ atmosférico tendem a suprimir longos períodos de produtividade próximas de zero que propiciaria, conseqüentemente, o colapso das safras.

Apesar dos resultados menos preocupantes quando considerados o incremento do CO₂, o cafeeiro poderá sofrer, independentemente do cenário RCP, com oscilações intensificadas em resposta a bienalidade da produtividade e a questões climáticas, intercalando anos de supersafra e safras diminutas. Esta perspectiva, tendo em vista que o Brasil responde por 33% da exportação mundial do grão e a mesorregião é o principal polo produtor, proporcionaria grandes oscilações das cotações do produto no mercado financeiro devido a “lei da oferta e da procura”. Nesse contexto, seriam esperadas quedas acentuadas dos preços da saca do grão em anos de supersafra, com perdas econômicas do setor, intercaladas, em anos de safras reduzidas, com explosão dos preços do produto devido à escassez do grão no mercado.

A grande questão para a mesorregião SSMG, considerando os resultados citados, parece ser em como enfrentar a mudança do clima sem sofrer com as grandes oscilações interanuais, especialmente de meados até o final do século XXI, tendo em vista que em termos médios o cafeeiro será beneficiado com aumento da produtividade.

Figura 5.9 – Evolução temporal da produtividade do cafeeiro arábica (kg/ha) desde meados do século XX até o final do século XXI simulada pelo Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). As simulações foram realizadas com CO₂ atmosférico fixo e considerando os incrementos anuais projetados pelo IPCC para os cenários RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b).



As rodadas com o modelo INLAND-coffee foram realizadas continuamente, considerando um tempo de integração de 141 anos tomando as simulações do Modelo Eta-HadGEM em 5 km como condições atmosféricas. O INLAND foi integrado na resolução horizontal de 5 km com um passo de tempo de 7200 s. Nas simulações com CO₂ fixo, foi mantido a valor de 353 ppm a partir do ano de 1990, com intuito de avaliar as respostas do cafeeiro sem incremento do gás carbônico.

Fonte: Produção da autora.

5.3.3. Projeções da produtividade em cenários de mudanças climáticas

Outro aspecto importante nas avaliações da produtividade em cenários climáticos futuros é como os rendimentos serão modificados espacialmente. Portanto, nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os campos espaciais da produtividade ao longo do século XXI, divididos em *timeslices* de 30 anos, sob os cenários de concentração RCP4.5 e RCP8.5. Nestas figuras, foram incluídos também os campos médios da temperatura do ar e do déficit hídrico, principais condicionantes climáticas que afetam o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro. Estes campos -temperatura e déficit - foram apresentados no Capítulo 4, todavia foram repetidos para proporcionar uma avaliação mais criteriosa. O conjunto completo das projeções das mudanças médias anuais, mostrados através de campos das diferenças entre os climas futuros e o período *baseline*, seguem no Apêndice B. Com intuito de manter a concisão, estão inclusas no texto apenas as figuras com os principais resultados.

As projeções mostram grandes mudanças da produtividade do cafeeiro na mesorregião SSMG, em especial na parte leste. No período *baseline*, devido a temperaturas médias anuais inadequadas, ou seja, abaixo de 18°C, a parte leste da mesorregião apresenta valores de produtividade abaixo de 1500 kg/ha. Porém, ao longo do século o aumento de temperatura do ar e a permanência de valores adequados de déficit hídrico (< 100 mm) contribuem para aumento significativo dos rendimentos médios do cafeeiro. Nesta localidade, os rendimentos passam a ser de 2500 a 3000 kg/ha, atingindo valores acima de 5000 kg/ha em 2071-2100, no cenário de concentrações intermediárias de CO₂ (RCP4.5). No cenário de altas concentrações de CO₂ este padrão também é demonstrado, no entanto, devido a elevação da temperatura do ar superior a 6°C, as maiores produtividades se restringem numa faixa menor e apresentam valores mais baixos, não ultrapassando 3000 kg/ha. Na parte central e oeste da mesorregião, os impactos são, em geral, negativos com quedas acentuadas da produtividade devido a grande elevação da temperatura do ar. Estas localidades que apresentavam no período *baseline* temperaturas médias anuais ótimas ao desenvolvimento do cafeeiro – entre 18 e 22,5°C

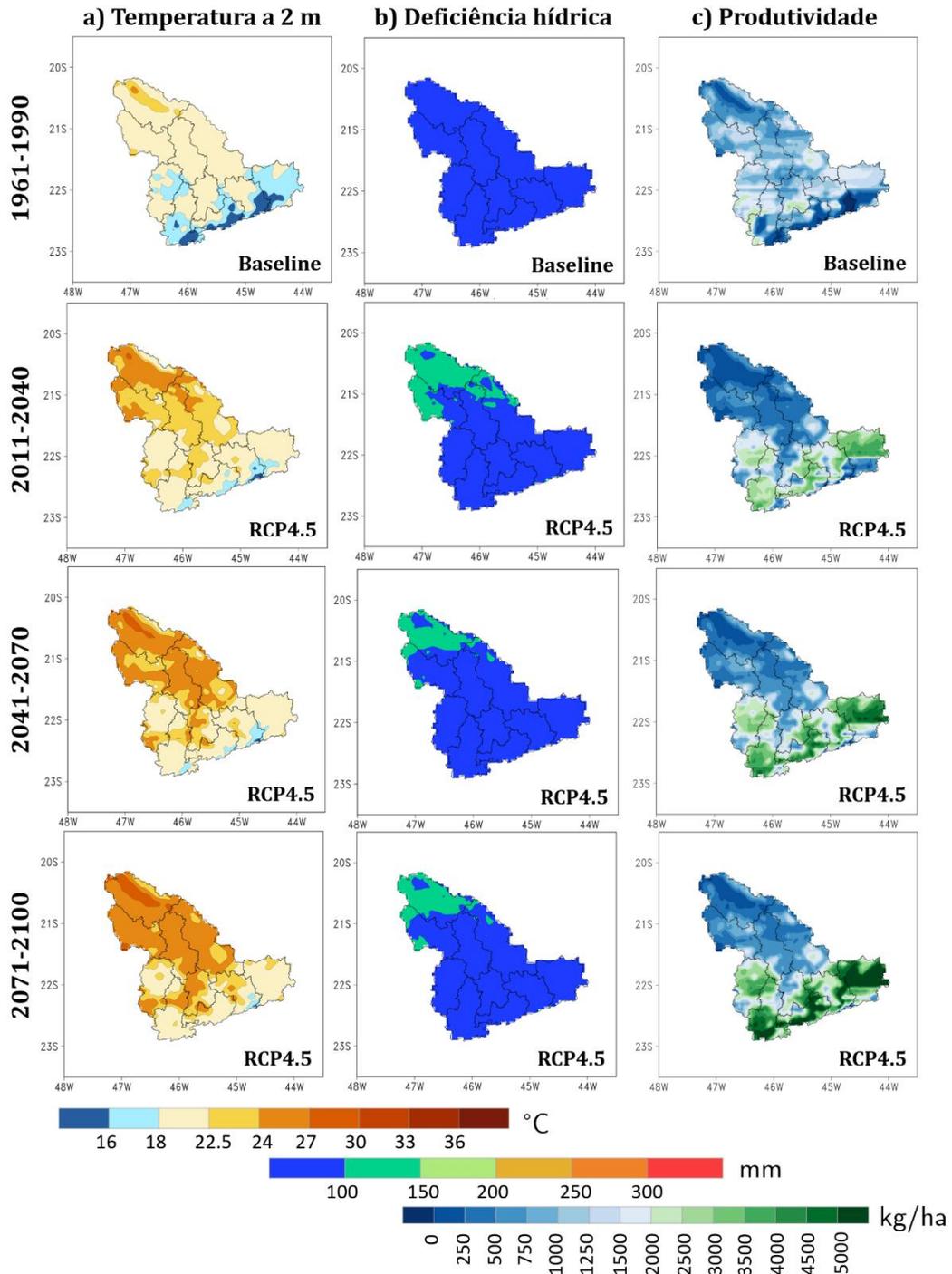
– passam a apresentar valores inadequados e restritos contribuindo assim para quedas acentuadas da produtividade, mais notadamente no cenário RCP8.5. É verificado também que o déficit hídrico aumenta, todavia, não atinge valores inadequados ao desenvolvimento do cafeeiro, permanecendo entre 100 e 200 mm. Isto possivelmente contribuiu para que a produtividade não apresentasse quedas mais acentuadas.

Na Figura 5.12 são mostradas as porcentagens das mudanças da produtividade do cafeeiro ao longo do século XXI sob os dois cenários projetados, RCP4.5 e RCP8.5, considerando as dez microrregiões da mesorregião SSMG. As microrregiões foram agrupadas em parte leste, central e oeste com a finalidade de facilitar a avaliação dos resultados. Está mostrado também na Figura 5.12 a topografia da mesorregião SSMG na grade regular de 5 km x 5 km. Corroborando os resultados apresentados anteriormente, nota-se que na parte leste ocorrem mudanças extremamente positivas com aumento acima de 100% na maior parte das microrregiões, em ambos os cenários RCP. Em Andrelândia e Itajubá, a produtividade ao longo do século XXI pode em alguns anos triplicar, quando considerado o cenário RCP4.5. Na parte central e oeste, excetuando apenas Poços de Caldas, são notadas tendências de redução da produtividade, com porcentagens de mudanças extremamente negativas.

Em síntese, tem-se que as microrregiões que apresentam altitudes superiores a 1000 m, como as da parte leste e a de Poços de Caldas, o incremento de CO₂ na atmosfera e o aumento da temperatura do ar, além da permanência de valores adequados da deficiência hídrica, contribuem para impactos positivos na produtividade do cafeeiro ao longo do século XXI. Enquanto que na parte central e oeste da mesorregião são notados impactos negativos em ambos cenários projetados, com quedas acentuadas da produtividade. Estes resultados podem ser inferidos mais claramente através da Tabela 5.3. Nas microrregiões de Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço e Andrelândia são notados aumentos médios da produtividade de no mínimo 54%, no cenário RCP8.5, e de 80%, no cenário RCP4.5. Em Itajubá e Andrelândia, uma atmosfera mais aquecida e com maior disponibilidade de CO₂ contribui para a produtividade aumentar no mínimo duas vezes

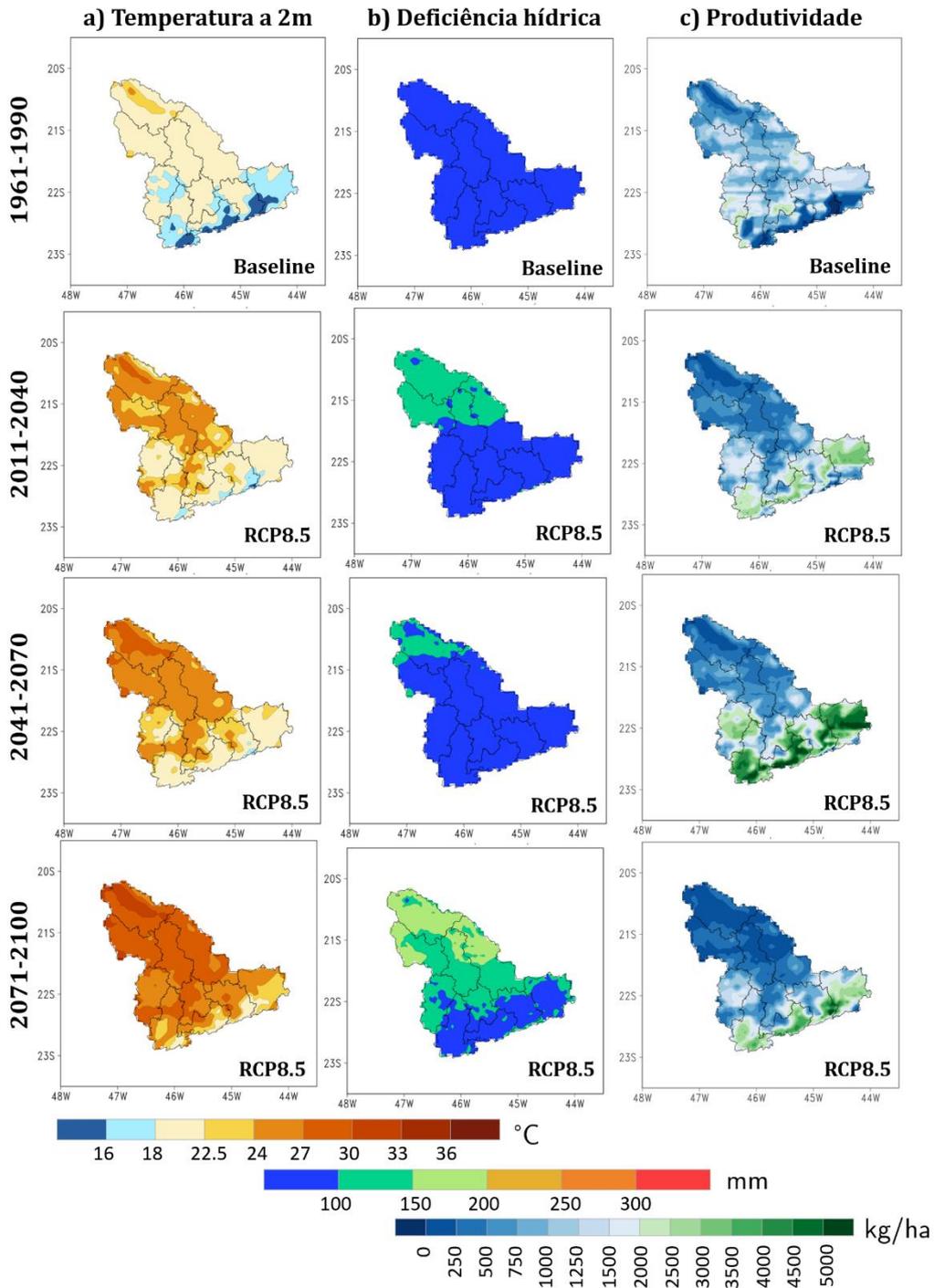
mais do que os valores registrados no período *baseline*, ou seja, os incrementos são superiores a 100% em ambos cenários RCP. Nas microrregiões de Poços de Caldas e Santa Rita de Sapucaí níveis mais excessivos de CO₂ atmosférico, como projetado no cenário RCP8.5, contribuem para o aumento da produtividade apenas em meados do século XXI (2041-2070). Entretanto, as projeções do cenário intermediário (RCP4.5) indicam aumentos em todos os *timeslices*, variando de 14 a 17% em 2011-2040, 40 a 43% em 2041-2070 e 67 a 68% em 2071-2100. Nas demais microrregiões do SSMG: Alfenas, Varginha, São Sebastião do Paraíso e Passos, são notadas quedas da produtividade ao longo de todo século, independentemente do cenário RCP. Nestas microrregiões as reduções são da ordem 17 a 60% em 2011-2040 e 2041-2070, podendo chegar a 71% no último *timeslice*, quando considerado o cenário de alta concentração de CO₂.

Figura 5.10 – Média anual da temperatura a 2 m (1ª coluna), em °C, e a deficiência hídrica (2ª coluna), em mm, simuladas pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km, e a produtividade média do cafeeiro arábica (3ª coluna), em kg/ha, estimada pelo Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período *baseline* e os *timeslices* futuros, sob o cenário RCP 4.5.



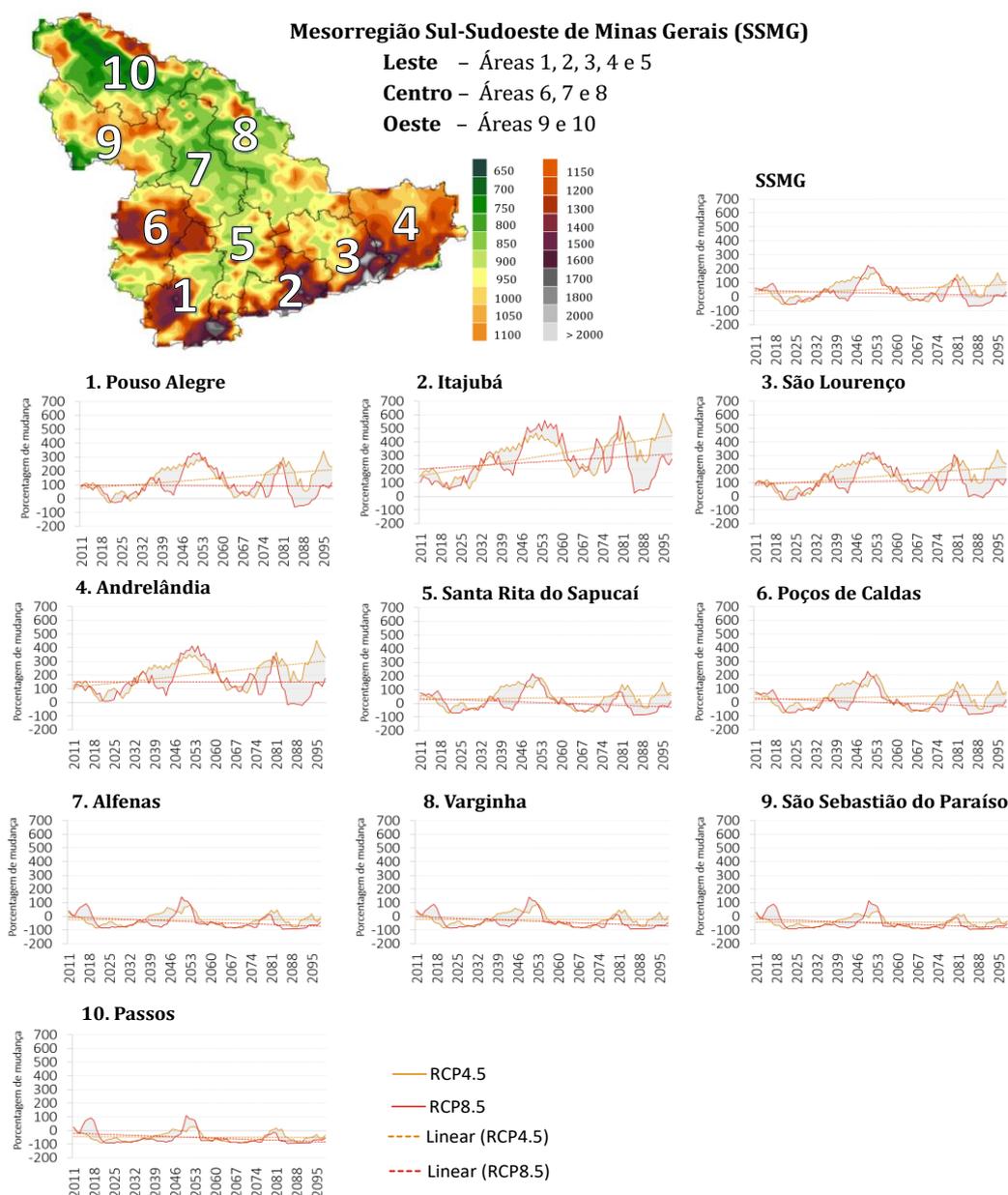
Fonte: Produção da autora.

Figura 5.11 – Média anual da temperatura a 2 m (1ª coluna), em °C, e a deficiência hídrica (2ª coluna), em mm, simuladas pelo Modelo Eta-HadGEM 5 km, e a produtividade média do cafeeiro arábica (3ª coluna), em kg/ha, estimada pelo Modelo INLAND-coffee para a mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). Período *baseline* e os *timeslices* futuros, sob o cenário RCP 8.5.



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.12– Porcentagem das mudanças da produtividade do cafeeiro projetadas ao longo do século XXI na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG) e nas microrregiões nela presente. Projeções dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 geradas pelo Modelo INLAND-coffee. Em destaque no lado superior esquerdo o mapa de topografia (m) da SSMG, na resolução horizontal lida pelo modelo INLAND.



As linhas contínuas mostram médias móveis de cinco anos, para o período de 2011 a 2100, das mudanças (%) na produtividade do cafeeiro, apresentadas como diferenças percentuais em relação ao período *baseline* (1961-1990). As linhas tracejadas mostram a tendência das mudanças ao longo do século XXI. A mesorregião SSMG foi subdividida em partes leste, central e oeste. As áreas correspondem as microrregiões do SSMG.

Fonte: Produção da autora.

Tabela 5.3 - Produtividade do cafeeiro arábica (Prod.), em kg/ha, porcentagem de mudança (% mud.) e tendência (Tend.) para as microrregiões da mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG), com suas respectivas altitudes médias (Alt.) (m). Período *baseline* e clima futuro, cenários RCP4.5 e RCP 8.5, divididos em *timeslices* de 30 anos. ↑ representa tendência positiva, ou seja, aumento da produtividade em relação ao período *baseline* e ↓ representa tendência negativa (redução).

Região SSMG/ Parte	Microrregião	Alt.	Valor/ Indicativo	1961-1990	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
				<i>Baseline</i>	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Leste	Pouso Alegre	1160	Prod.	1115	2078	1717	2708	2967	3428	1767
			% mud.	-	86	54	143	166	207	58
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Itajubá	1200	Prod.	689	2057	1860	2806	3315	3609	2224
			% mud.	-	199	170	307	381	424	223
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	São Lourenço	1167	Prod.	950	1862	1523	2356	2658	3006	1814
			% mud.	-	96	60	148	180	216	91
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Andrelândia	1143	Prod.	1033	2444	2125	3203	3496	4091	2076
			% mud.	-	137	106	210	238	296	101
			Tend.	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Santa Rita do Sapucaí	970	Prod.	1223	1431	1114	1743	1694	2051	881	
		% mud.	-	17	-9	43	38	68	-28	
		Tend.	-	↑	↓	↑	↑	↑	↓	
Central	Poços de Caldas	1075	Prod.	1458	1658	1225	2037	1920	2438	1016
			% mud.	-	14	-16	40	32	67	-30
			Tend.	-	↑	↓	↑	↑	↑	↓
	Alfenas	880	Prod.	951	568	561	774	703	816	365
			% mud.	-	-40	-41	-19	-26	-14	-62
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Varginha	897	Prod.	1114	737	697	920	874	1011	421	
		% mud.	-	-34	-37	-17	-22	-9	-62	
		Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
Oeste	São Sebastião do Paraíso	932	Prod.	1029	445	515	616	596	648	302
			% mud.	-	-57	-50	-40	-42	-37	-71
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Passos	876	Prod.	723	292	362	402	406	420	211
			% mud.	-	-60	-50	-44	-44	-42	-71
			Tend.	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Fonte: Produção da autora.

5.4. Conclusões do capítulo

O objetivo deste capítulo consistiu na avaliação dos impactos das mudanças das climáticas na produtividade do cafeeiro arábica. Para tal, foram consideradas as simulações geradas pelo modelo INLAND na resolução horizontal de 5 km, sob os cenários de concentração RCP4.5 e RCP8.5 gerados pelo modelo Eta-HadGEM. Inicialmente, o cafeeiro foi implementado no modelo INLAND e posteriormente foi calibrado e validado para representar a produtividade da cultura na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). O INLAND-*coffee* conseguiu reproduzir os rendimentos médios da mesorregião SSMG, além de representar razoavelmente a variabilidade interanual da produtividade em resposta às condições do clima e a bienalidade da cultura. O modelo também mostrou um desempenho razoável em distinguir diferenças espaciais mais refinadas, através das avaliações da produtividade média e anuais das microrregiões de Alfenas e Poços de Caldas. Diante dos resultados citados, pode-se dizer que o INLAND-*coffee* agora integra a restrita lista de modelos mecanísticos existentes na literatura, sendo uma boa ferramenta para estimativa da produtividade do cafeeiro, além de ser praticamente o único que inclui representações mais holísticas do sistema solo-planta-atmosfera.

Quanto às projeções da produtividade cafeeira ao longo do século XXI, sob os cenários de concentrações intermediárias (RCP4.5) e altas concentrações de CO₂ (RCP8.5), pode-se inferir que:

Na mesorregião SSMG:

- Os incrementos do CO₂ atmosférico contribuíram para diminuir os efeitos negativos da elevação da temperatura do ar até valores abaixo de 800 ppm, válido quando a disponibilidade de água ainda é adequada. Concentração de CO₂ superior a 800 ppm aliada com aumento da temperatura do ar acima de 4°C e valores restritos de suprimento de água, contribuem para atenuar o efeito benéfico e fertilizante do gás carbônico;

- Os incrementos na produtividade são da ordem de 21%, 57% e 91%, em 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente, no cenário RCP4.5 e 6% e 66%, em 2011-2040 e 2041-2070, no RCP8.5. Em 2071-2100, do cenário RCP8.5, ocorre queda de 3% da produtividade;
- Apesar da tendência média extremamente positiva, a mesorregião sofrerá com a intensificação da variabilidade interanual dos rendimentos do cafeeiro, alternando anos de supersafra com safras diminutas. Esta situação poderá causar grande volatilidade nas cotações do grão e conseqüentemente grande instabilidade no mercado mundial.

Nas microrregiões do SSMG:

- As microrregiões da parte leste, as quais apresentam altitudes superior a 1000 m, são grandemente beneficiadas com aumento da produtividade em ambos cenários RCP. Enquadram-se neste contexto as microrregiões de Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço e Andrelândia;
- As microrregiões da parte central, excetuando Poços de Caldas, e oeste são notadas quedas acentuadas da produtividade ao longo de todo século XXI, independentemente do cenário RCP. Enquadram-se neste contexto as microrregiões de Alfenas, Varginha, São Sebastião do Paraíso e Passos;
- Em Santa Rita do Sapucaí (parte leste) e Poços de Caldas (central) é verificado o mesmo padrão de aumentos da produtividade em todos os *timeslices* do cenário RCP4.5 e em apenas 2041-2070 no cenário RCP8.5.

6 SÍNTESE E CONCLUSÕES GERAIS

Esta tese teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro arábica em áreas do Sudeste do Brasil, sob efeitos de dois cenários de concentração dos gases do efeito estufa e suas forçantes radiativas no clima. Os cenários considerados foram o RCP4.5 e RCP8.5, regionalizados pelo modelo Eta em altíssima resolução horizontal, a partir das condições de contorno lateral do modelo global HadGEM2-ES. A produtividade do cafeeiro foi estimada a partir de duas abordagens. A primeira consistiu na estimativa do rendimento a partir da aptidão climática da área de estudo através do zoneamento agroclimático. O zoneamento agroclimático é uma das principais técnicas usadas em estudos para inferir os impactos das mudanças climáticas em áreas cafeeiras do Brasil. Todavia, até o presente momento, os estudos já realizados possuem algumas limitações metodológicas tais como: i) o uso de projeções de cenários climáticos em baixa resolução espacial; ii) estimativa da deficiência hídrica usando a evapotranspiração potencial calculada por métodos simplificados; iii) análise apenas da aptidão climática da cultura, sem considerar a produtividade do cafeeiro em cenários climáticos futuros; iv) projeções do rendimento do cafeeiro sem considerar a influência interativa entre os cenários de mudanças climáticas e o incremento do CO₂ atmosférico. A segunda abordagem consistiu na estimativa da produtividade do cafeeiro a partir do modelo INLAND. O INLAND foi selecionado por simular a produtividade a partir dos mecanismos fisiológicos da planta e, portanto, incluem a influência do CO₂ atmosférico no crescimento e desenvolvimento da cultura; além de ser atualmente usado como componente de superfície de modelos atmosféricos brasileiros. O INLAND possui em seu modo agrícola representações das culturas da soja, milho, trigo e cana-de-açúcar. Para o cafeeiro arábica foi realizado um esforço inovador de incluir a representação dessa cultura. O modelo foi adaptado, a partir da adequação dos parâmetros das equações e módulos já existentes no INLAND-Agro, e posteriormente foi calibrado e validado para reproduzir as tendências da produtividade do cafeeiro arábica na mesorregião Sul-Sudoeste de Minas Gerais (SSMG). O modelo apresentou desempenho satisfatório nas estimativas da produtividade, conseguindo

capturar a variabilidade interanual da produção em resposta ao clima e a bienalidade da cultura. O *INLAND-coffee* agora integra a lista de pouquíssimos modelos que estima a produtividade a partir dos mecanismos físicos e fisiológicos da planta em sinergia com o sistema solo-planta-atmosfera.

Quanto as projeções da produtividade em cenários climáticos futuros, os resultados obtidos para a mesorregião SSMG mostram tendências médias diferentes, quando consideradas as estimativas a partir das duas abordagens metodológicas. Vale ressaltar que na primeira a abordagem foi considerada a produtividade atingível, ou seja, o rendimento máximo que pode ser obtido pelo cafeeiro, em um dado ambiente, em função da fisiologia da espécie arábica (SENTELHAS et al., 2016; CUNHA et al., 2011). Nesta abordagem, o rendimento foi associado apenas as condições climáticas de temperatura do ar e déficit hídrico, obtidas pelo zoneamento agroclimático do cafeeiro. Enquanto que na segunda abordagem foi considerada a estimativa da produtividade real, ou seja, o rendimento do café em condições mais reais de campo, pois concilia os efeitos das condições atmosféricas, do solo e do manejo (SENTELHAS et al., 2016; CUNHA et al., 2011). Sendo assim, nas considerações feitas a seguir, o intuito principal é apenas o de demonstrar a tendência da produtividade ao longo do século XXI obtidas a partir das duas abordagens metodológicas.

Nas projeções da produtividade atingível, ou seja, considerando apenas os impactos das mudanças na temperatura do ar e no déficit hídrico, são notadas quedas ao longo do século XXI, independentemente do cenário de concentração RCP. Enquanto que as projeções da produtividade geradas pelo modelo *INLAND-coffee*, as quais também incluem os efeitos diretos do incremento do CO₂ na planta, mostram aumento, sendo a mesorregião extremamente beneficiada quando considerado o cenário de concentração intermediária de CO₂ (RCP4.5). Estes resultados concordam com os estudos experimentais do cafeeiro enriquecido com CO₂ e as hipóteses levantadas (GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2016). O CO₂ tem um papel crucial em atenuar os efeitos negativos da elevação da temperatura do ar, ao menos sob condição

de suprimento hídrico adequado, corroborando os achados de Rodriguez et al. (2016). Porém, aumento da temperatura do ar acima de 5-6°C acompanhado com níveis mais excessivos de CO₂ atmosférico (> 800 ppm) e restrição hídrica, neutraliza o efeito benéfico e fertilizante do gás carbônico, como notado no *timeslice* de 2071-2100 do cenário RCP8.5. Apesar dos resultados médios na mesorregião serem notadamente positivos, o cafeeiro poderá sofrer com intensificação da variabilidade interanual da produção, intercalando anos de supersafra e safras diminutas. Sendo o Sul de Minas Gerais responsável pela maior parte da produção brasileira de café arábica, esta situação poderia causar grande instabilidade no mercado mundial e, conseqüentemente, grande volatilidade das cotações do produto.

Em termos espaciais, há um consenso entre os resultados obtidos das abordagens metodológicas em grande parte das microrregiões do SSMG. As microrregiões de Pouso Alegre, Itajubá, São Lourenço e Andrelândia, agrupadas nesta tese como parte leste, as quais apresentam altitudes médias superior a 1000 m, são extremamente beneficiadas com aumento significativo da produtividade do cafeeiro, sendo mais contundente no cenário RCP4.5. Em Itajubá e Andrelândia são notados incrementos da produtividade em ambas metodologias de estimativa e em ambos cenários projetados. Em Pouso Alegre e São Lourenço, nota-se que o CO₂ atenuou os efeitos prejudiciais das temperaturas mais elevadas contribuindo para o aumento da produtividade até nos 30 anos finais do século XXI, como demonstrado pelas simulações do *INLAND-coffee*. A microrregião de Santa Rita do Sapucaí agrupada também como parte leste, é beneficiada com aumentos contundentes da produtividade no cenário RCP4.5, diferentemente das estimativas da produtividade atingível, as quais projetavam quedas em ambos cenários RCP. Nas demais microrregiões, a saber: parte central – Alfenas e Varginha e parte oeste – São Sebastião do Paraíso e Passos, independentemente do método de estimativa e do cenário de concentração, o aumento das temperaturas médias anuais e da restrição hídrica contribuem para quedas acentuadas da produtividade ao longo do século XXI. Nestas microrregiões, considerando as características genéticas e fisiológicas atuais das cultivares de cafeeiro arábica, é necessário propor medidas de adaptação que levem em

consideração a elevação de temperatura de no mínimo 4°C, em termos mais condizentes com a perspectiva atual, e de até 8°C caso as emissões dos gases do efeito estufa continuem intensificadas até o final do século XXI. Em resumo, nota-se que os resultados indicam, caso não seja adotada nenhuma medida adaptativa ou mitigadora, migração das áreas com maior potencial produtivo para regiões de altitudes mais elevadas, o que poderia dificultar o manejo do cafeeiro, devido especialmente a entrada de máquinas em terrenos elevados, além de que poderia produzir impactos ambientais nas áreas de remanescentes florestais da Mata Atlântica.

Apesar dos resultados estarem totalmente dependentes dos modelos utilizados – Eta-HadGEM e INLAND-*coffee* – e os cenários climáticos selecionados fornecem indícios essenciais para o planejamento do cafeeiro a longo prazo. Isto incluem, principalmente, adequação das práticas de cultivos, uso de cultivares tolerantes a temperaturas mais elevadas e direcionamento das microrregiões do Sul-Sudoeste de Minas Gerais com menor risco climático e/ou beneficiadas com aumento da disponibilidade de CO₂ atmosférico. Todavia, os estudos na área, assim como em qualquer linha da ciência dos impactos das mudanças climáticas, devem ser continuados com a finalidade de diminuir as incertezas das abordagens metodológicas e de tentar inserir os avanços tecnocientíficos da cafeicultura. O uso interativo ou complementar de práticas agronômicas e de cultivares mais tolerantes ao calor e a seca podem contribuir para atenuar os efeitos das mudanças climáticas e conseqüentemente favorecer a sustentabilidade do cultivo do cafeeiro mesmo em áreas marginais (CAMARGO et al., 2010). Portanto, inserir parametrização de tais processos, como por exemplo representação de sistemas agroflorestais e/ou uso de parâmetros biofísicos já oriundos de cultivares melhoradas, constitui-se um dos principais desafios da simulação da produtividade cafeeira para os próximos anos.

Sugestões de trabalhos futuros

Os tópicos a seguir são sugeridos em relação ao zoneamento agroclimático e as estimativas da produtividade atingível:

- Replicar a metodologia usando o cafeeiro robusta, segunda espécie mais comercializada no Brasil e no mundo;
- Avaliar os impactos das mudanças climáticas em outras áreas cafeeiras importantes economicamente para o Brasil, tais como o cerrado mineiro, montanhas capixabas e oeste da Bahia;
- Usar projeções regionalizadas do modelo Eta a partir de outros modelos globais, com intuito de incluir as incertezas das projeções do clima futuro.

As seguintes melhorias e estudos são sugeridos em relação ao modelo INLAND-*coffee*:

- Calibração e validação para outras áreas com cafeeiro arábica importantes economicamente para o Brasil;
- Parametrizações de outras tensões externas, tais como: estresse causado por pragas e doença e esgotamento da cultura ao longo dos anos, as quais podem fornecer estimativas da produtividade mais fidedignas em escalas mais reduzidas;
- Testes com o módulo de irrigação. Esta ferramenta é de total importância em simulações da produtividade em outras áreas cafeeiras do Brasil onde a irrigação já é aplicada, tais como no cerrado mineiro e no oeste da Bahia, ou quando a prática se tornar um meio cada vez mais fundamental para aumentar a produtividade e se adaptar ao calor e à seca;
- Implementação da espécie *Coffea canefora*.
- Testes com o módulo de dinâmica de nitrogênio no solo;
- Acoplamento do INLAND-*coffee* a um modelo atmosférico permitindo assim simular feedbacks bidirecionais entre a atmosfera e a cafeicultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN R. G.; PEREIRA L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em: 31 de mar. 2015.

AMARAL, G. M.; SOUZA, A. L. L. F.; SILVA, M. R. S.; PIFFER, T. R. O. Modelo agrometeorológico para a estimativa de produtividade do café nos municípios de Barreiras e Prado no Estado da Bahia. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, Foz do Iguaçu PR. **Anais..13** a 18 de abril de 2013.

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, 2012. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n4p1381

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. D. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004. doi: 10.1590/S0100-204X2004001100001

BACA M.; LÄDERACH, P.; HAGGAR, J.; SCHROTH, G.; OVALLE O. An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. **PLoS One**, v. 9, n. 2, p. e88463, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0088463

BALIZA D. P; OLIVEIRA, A. L.; DIAS, R. A. A.; GUIMARÃES, R. J.; BARBOSA, C. R. Antecipação da produção e desenvolvimento da lavoura cafeeira implantada com diferentes tipos de mudas. **Coffee Science**, v. 8, n. 1, p. 61-68, 2013.

BALL, J. T.; WOODROW, I. E.; BERRY, J. A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: **Progress in photosynthesis research**. Springer Netherlands, p. 221-224, 1987.

BARROS, G. M. **Uso do modelo 3-PG para estimar componentes do balanço de c em cafezal**. 2016. 53p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2016.

BATISTA, E.R. **Respostas fisiológicas e metabólicas de duas cultivares de Coffea arabica L. submetidas a atmosferas enriquecidas em CO₂ em câmaras de topo aberto e sistema FACE**. 2015. 142p. Tese (Doutorado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) - Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2015

BENEZOLI, V. H. **Efeito da mudança na cobertura do solo na vazão média anual na bacia do rio Xingu**. 2014. 48 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7315/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 de set. 2016.

BETTS, A. K.; MILLER, M. J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 693-709, 1986. doi: 10.1002/qj.49711247308

BJØRNÆS, C. **A guide to Representative Concentration Pathways**. CICERO. Center for International Climate and Environmental Research, 2013.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Weather and forecasting**, 9, 265-278, 1994. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2)

BRAGANÇA, R.; DOS SANTOS, A. R.; DE SOUZA, E. F.; DE CARVALHO A. J. C.; LUPPI, A. S. L.; DA SILVA, R. G. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimatológico do café arábica no Espírito Santo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 77-82, 2016. doi: 10.18227/1982-8470ragro.v10i1.2809

BUNN, C. **Modeling the climate change impacts on global coffee production**. Tese (Doutorado em Agricultura) - Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, 2015.

BUNN C.; LÄDERACH, P.; RIVERA, O. O.; KIRSCHKE, D. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 89-101, 2015. doi: 10.1007/s10584-014-1306-x

CAFEICULTURA. A revista do agronegócio do café. **Catálogo Curiosidades**. Disponível em: <http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=5548>. Acesso em: 22 abr. 2013. História do Café A Importância Socioeconômica, 2006.

CAMARGO, A.P. Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e robusta no Brasil. In: **Fundação IBGE, recursos, meio ambiente e poluição**. 1977. p.68-76.

CAMARGO, M. B. P. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010. DOI: 10.1590/S0006-87052010000100030

CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JUNIOR, M. J.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R.; PINTO, H. S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. **Ecosistema**, Espírito Santo do Pinhal, v.9, n.1, 166-171 p. 1984.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CAMARGO, M. B. P.; ROLIM, G. S.; SOUZA, P. S.; GALLO, P. B. Air temperature in different *Coffea arabica* microclimates arborized with dwarf coconut palm and rubber tree in Mococa, SP, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COFFEE SCIENCE, 22., 2008, Campinas-SP, Brasil. **Proceedings...** 2008. p. 1-4. Disponível em: <http://www.asic-cafe.org/proceedings/3591/toc/8/conf>. Acesso em: 20 de mar. 2016

CAMPOSTRINI, E. **Potencialidade fotossintética de cinco genótipos de *Coffea canefora* Pierre**. 1994. 64p. Dissertação (Mestrado em fisiologia vegetal) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, 1994.

CASTANHO, A. D. A.; COE, M. T.; COSTA, M. H.; MALHI, Y.; GALBRAITH, D.; QUESADA, C. A. Improving simulated Amazon forest biomass and productivity by including spatial variation in biophysical parameters. **Biogeosciences**, v. 10, n. 4, p. 2255, 2013. DOI:10.5194/bg-10-2255-2013

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W.L.; CASTRO NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 41, n. 3, p. 10-5216/pat.v41i3. 12760, 2011. doi: 10.5216/pat.v41i3.12760

CAVERO, P. A. S. **Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr) na Amazônia—estudo de caso no município de Santarém-PA**. 2016. 105p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, 2016. Disponível em: <http://bdtd.inpa.gov.br/bitstream/tede/2172/5/Poholl%20Adan.pdf>. Acesso em: 5 de apr. 2017

CHANNAN, S.; COLLINS, K.; EMANUEL, W. R. **Global mosaics of the standard MODIS land cover type data**. College Park, Maryland, USA: University of Maryland and the Pacific Northwest National Laboratory, 2014. v. 30.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635-653, 2012. doi: 10.1007/s00382-011-1002-8

CHOU, S. C.; LYRA, A. A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014a. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.;

SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014b. doi: 10.4236/ajcc.2014.35039

CLIMAPEST FACE (FREE AIR CO₂ ENRICHMENT). Site do Projeto da Embrapa Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.climapestface.cnptia.embrapa.br/projeto>> . Acesso em 30 de outubro de 2013.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; et al. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051–1075, 2011. DOI:10.5194/gmd-4-1051-2011

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café**. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 22 abr. 2015.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. **A cafeicultura familiar brasileira no contexto do Ano Internacional da Agricultura Familiar – Notícias e análise**. 2014. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/447-a-cafeicultura-familiar-brasileira-no-contexto-do-ano-internacional-da-agricultura-familiar>. Acesso em: 18 fev. 2016.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. **Catálogo observatório – Notícias e análise**. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/772-2017-02-20-16-27-28>. Acesso em: 20 fev. 2017.

COX, P. **Description of the triffid dynamic global vegetation model**. London: Hadley Centre, 2001. Hadley Centre technical note 24.

CUADRA, S. V.; COSTA, M. H.; KUCHARIK, C. J.; DA ROCHA, H. R.; TATSCH, J. D.; INMAN-BAMBER, G.; DA ROCHA, R. P.; LEITE, C. C.; CABRAL, M. R. A biophysical model of sugarcane growth. **G C B Bioenergy**, v. 4, p. 36-48, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2011.01105.x

CUNHA, G. R.; PIRE, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; SANTI, A.; PASINATO, A. A evolução do conceito de rendimento em agricultura e as estratégias de segurança alimentar. **Revista Plantio Direto**. On-line, 2011. Disponível em: http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=1081. Acesso em: 20 fev. 2017.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007. doi: 10.1590/S1677-04202007000400014

DAMATTA, F.M.; GODOY, A.G.; MENEZES-SILVA, P.E.; MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, L.M.V.P.; MORAIS, L.E.; TORRE-NETO, A.; GHINI, R. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment conditions: disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. **Journal of Experimental Botany**, v.67, p.341-352, 2016. DOI: 10.1093/jxb/erv463.

DAVIS, A. P.; GOLE, T.W.; BAENA, S.; MOAT, J The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **PLoS One**, v. 7, n. 11, p. e47981, 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0047981

DELIRE, C.; FOLEY, J. A., Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. **J. Geophys. Res.**, 104, 16.895-16.909, 1999.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO-Irrigation and Drainage Paper, n.33), 193 p., 1979.

DRINNAN, J. E.; MENZEL, C. M. Temperature affects vegetative growth and flowering of coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, v.70, p.25-34, 1995.

EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D22, 2003. doi: 10.1029/2002JD003296

EPIPHANIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29. n.3, 439-447 p. Mar 1994.

EUGENIO, F. C.; PELUZIO, T. M. O.; PEREIRA, A. A. B.; DOS SANTOS, A. R.; PELUZIO, J. B. E.; BRAGANÇA, R.; FIEDLER, N. C.; PAULA, E. D. S. O. Zoneamento agroclimatológico do *Coffea canephora* para o espírito santo mediante interpolação espacial. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 319-328, 2014.

FARQUHAR, G.D.; SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosyntheses. **Annual review of plant physiology**, 33, 317-345, 1982.

FARQUHAR, G. D.; CAEMMERER, V.S.; BERRY, J. A. A biogeochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, **Annual review of plant physiology**, 149, 78-90, 1980

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, 1975. doi: 10.1175/1520-0469(1975)032<1475:TSEAN>2.0.CO;2

FOLEY, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, 10, 603-628, 1996. DOI: 10.1029/96GB02692

FREDERICO, Samuel. Globalização, competitividade e regionalização: a cafeicultura científica globalizada no território brasileiro. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 18, n. 1, p. 55-70, 2014. ISSN 2179-0892. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/viewFile/81077/84725>. Acesso em: 20 fev. 2017.

GHINI, R.; TORRE-NETO, A.; DENTZIEN, A.F.M.; GUERREIRO-FILHO, O.; IOST, R.; PATRÍCIO, F.R.A.; PRADO, J.S.M.; THOMAZIELLO, R.A.; BETTIOL, W.; DAMATTA, F.M. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO₂ enrichment. **Climatic Change**, v.132, p.307-320, 2015. DOI:10.1007/s10584-015-1422-2.

HANAN, N.P.; BERRY, J. A.; VERMA, S. B.; WALTER-SHE, E. A.; SUYKERC, A. E.; BURBA, G. G.; DENNING, A. S. Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, 131, 162–179, 2005.

HENGL, T.; JESUS, J. M.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B. M. RIBEIRO, E.; SAMUEL-ROSA, A.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G. B.; WALSH, M.; GONZALES, M. R. SoilGrids1km – global soil information based on automated mapping. **PLOS One**, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0105992

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PAM: Produção Agrícola Municipal**. 2016. Rio de Janeiro. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br. Acesso em: 10 mai. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão Territorial Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Twelfth Session of Working Group I. **Summary for Policymakers, 2013**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf. Acesso em: 30 out. 2013.

JANJÍČ, Z. I. Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 6, p. 1234-1245, 1984. DOI: 10.1175/1520-0493(1984)112<1234:NASAEC>2.0.CO;2

JARVIS, A.; REUTER, H.I., NELSON, A.; GUEVARA, E. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database**. 2008. Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org>. Acesso em: 25 de jan. 2015.

JOÃO, G. A. **Simulação dos impactos do aumento do CO₂, temperatura do ar e precipitação na produtividade da Brachiaria brizantha utilizando o modelo InLand**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2016. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7395/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Acesso em: 20 de set. 2016.

KARLSSON, K. G.; RIIHELÄ, A.; MÜLLER, R.; MEIRINK, J. F.; SEDLAR, J.; STENGEL, M.; LOCKHOFF, M.; TRENTMANN, J.; KASPAR, F.; HOLLMANN, R.; WOLTERS, E. CLARA-A1: CM SAF CLOUDS, Albedo and RADIATION dataset from AVHRR data—edition 1—monthly means/daily means/pentad means/monthly histograms. **Satellite Application Facility on Climate Monitoring**, 2012. doi:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V001

KEATING, B.A.; ROBERSTON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v. 61, p. 253-271, 1999. DOI: 10.1016/S0378-4290(98)00167-1

KOBAYASHI, E. S. **Consumo de Água e Produtividade de Cafeeiros Arábica na Região de Mococa, SP**. 2007. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais), Instituto Agrônomo. Campinas, 2007. 77 f.

KUCHARIK, C.J.; BRYE, K.R. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) Yield and Nitrate Loss Predictions for Wisconsin Maize Receiving Varied Amounts of Nitrogen Fertilizer. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 247-268, 2003. DOI:10.2134/jeq2003.2470

KUCHARIK, C.J.; TWINE, T.E. Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.146, p.134–158, 2007. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.05.011

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; GOWER, S. T.; LENTERS, J. D.; YOUNGMOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, 14, 795-825, 2000. DOI: 10.1029/1999GB001138

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 31, n. 1, p. 118-133, 1974. DOI: 10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2

LIBARDI, V. C. M., AMARAL, J. A. T., AMARAL, J. F. T. Crescimento Vegetativo Sazonal do Cafeeiro (*Coffea canephora pierre* var. conilon) no sul do estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, 23-28 p. 1998.

LIU, W. T. H.; LIU, B. W. Y. Comparação de três modelos de previsão de safra de café no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 40, n.8, 801–807 p., 1988.

LUNZ, A. M. P. **Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

LUPPI A. S. L.; SANTOS, A. R.; EUGÊNIO, F. C.; BRAGANÇA, R.; PELÚZIO, J. B. E.; DALFI, R. L.; SILVA, R. G. Metodologia para Classificação de Zoneamento Agroclimatológico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2014. doi: 10.5380/abclima.v15i0.37388

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 2, p. 175-188, 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201502225

LYRA, A. A.; TAVARES, P. S.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMAN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-20, 2017. doi: 10.1007/s00704-017-2067-z

MANCUSO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; PERDONÁ, M. J. Produção de café sombreado. **Colloquium Agrariae**. p. 31-44, 2013. doi: 10.5747/ca.2013.v09.n1.a087

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012. DOI: 10.1007/s00382-011-1155-5

MARTIN, G. M. et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, 4, 723–757, 2011. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011

MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; LIDON, F.C.; DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in Coffea spp. plants. **Climatic Change**, v.126, p.365-379, 2014a. DOI: 10.1007/s10584-014-1236-7.

MARTINS S. C. V.; GALME'S, J.; CAVATTE, P. C.; PEREIRA, L. F.; VENTRELLA, M. C; ET AL. Understanding the Low Photosynthetic Rates of Sun and Shade Coffee Leaves: Bridging the Gap on the Relative Roles of Hydraulic, Diffusive and Biochemical Constraints to Photosynthesis. **PLoS ONE** 9(4): e95571, 2014b. DOI:10.1371/journal.pone.0095571

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo. Editora Globo, 1991. Coleção do fazendeiro: Grão. Publicações Globo Rural.

MEDEIROS, G. O. R. **Diagnóstico da erosão e a expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 2016. 279p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos-SP, 2016. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.29.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 20 de set. 2016.

MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J. S.; KAINUMA, M. L. T.; LAMARQUE, J-F.; MATSUMOTO, K.; MONTZJA, S. A.; RAPER, S. C. B.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDEERS, G. J. M.; VAN VUUREN, D. P. P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 213, 2011. doi 10.1007/s10584-011-0156-z

MEIRELES, E. J. L.; CAMARGO, M.; PEZZOPANE, J. R. M.; THOMAZIELLO, R.; FAHL, J. I.; BARDIN, L.; SANTOS, J. C. F.; JAPIASSÚ, L. B.; GARCIA, A. W. R.; MIGUEL, A. E.; FERREIRA, R. A. **Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005**. Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Café, 2009.

MEIRELES, E. J. L.; VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C. Zoneamento agroclimático: Um estudo de caso para o café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 50-57, 2007.

MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851-875, 1982. doi: 10.1029/RG020i004p00851

MENDONÇA, R. F.; RODRIGUES, W. N.; MARTINS, L. D. TOMAZ, M. A. Abordagem sobre a bionalidade de produção em plantas de café. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.13; 2011. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2011b/ciencias%20agrarias/abordagem%20sobre%20a%20bionalidade.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2016.

MENDONÇA, P. V. Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather. In: CONGRESSO LUSO-ESPANHOL PARA O PROGRESSO DAS CIÊNCIAS, 28., 1958, Madrid. **Anales...** Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, 1958. p. 271-282.

MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; LYRA, A. A.; BUSTAMANTE, J. F.; BASTOS, P. R.; LAZIC, L.; MORELLI, S.; RISTIC, I. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012. DOI:10.1007/s00703-012-0182-z

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Catálogo de cultura** - Café. <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>. Acesso em: 22 abr. 2013

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília- Brasil, 2016. v. 2.

MORAES, W.B.; JESUS JUNIOR, W.C.; MORAES, W.B.; CECÍLIO, R.A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Maranhão, v. 5, n. 2, fev., 2011.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.3, p.223-231, mar., 2004.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010. doi:10.1038/nature08823

NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Earth System Research Laboratory – Global Monitoring Division. Ed Dlugokencky & Pieter Tans. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. **Recent Global CO2**. Fevereiro/2017. Obtido via base de dados NOAA. 2017. Online. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 10 mai. 2017.

NUNES, F. L.; CAMARGO, M. B. P.; FAZUOLI, L. C.; ROLIM, G. S.; PZZOPANE, J. R. M. Modelos agrometeorológicos de estimativa da duração do estágio floração-maturação para três cultivares de café arábica. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.4, p1011-1018, 2010.

O'CONNOR, F. M.; JOHNSON, C. E.; MORGENSTERN, O.; COLLINS, W. J. Interactions between tropospheric chemistry and climate model temperature and humidity biases. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 16, 2009. DOI: 10.1029/2009GL039152

O'CONNOR, F. M. et al. Evaluation of the new UKCA climate-composition model-Part 2: The Troposphere. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 6, n. 1, 2013.

OLIOSI, G.; GILES, J.A.D.; RODRIGUES, W.P.; RAMALHO, J.C.; PARTELLI, L.F. Microclimate and development of Coffea canephora cv. Conilon under different shading levels promoted by Australian cedar (Toona ciliata M. Roem. var. Australis). **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 528-538, 2016. doi: DOI: 10.21475/ajcs.2016.10.04.p7295x

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Adoção do Acordo de Paris**. Conferência das Partes, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 10 de mar. 2017

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (OIC). **Catálogo café**. 2015. Disponível em: http://www.ico.org/pt/coffee_storyp.asp?section=Sobre_o_café. Acesso em: 10 mai. 2015.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (OIC). **Catálogo de estatística – dados históricos**. 2017. Disponível em: http://www.ico.org/pt/new_historical_p.asp?section=Estat%EDstica. Acesso em: 05 jan. 2017.

ORNL DAAC. **Spatial Data Access Tool (SDAT)**. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Land Cover Type 1 (2007): IGBP global vegetation classification scheme. Disponível em: http://webmap.ornl.gov/ogcdown/wcsdown.jsp?dg_id=10004_31. Acesso em: 09 fev. 2016.

OVALLE-RIVERA, O.; LÄDERACH, P.; BUNN, C.; OBERSTEINER, M. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **Plos One**, v. 10, n. 4, p. e0124155, 2015. DOI:10.1371/journal.pone.0124155

PALMER, J. R.; TOTTERDELL, I. J. Production and export in a global ocean ecosystem model. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 48, n. 5, p. 1169-1198, 2001. DOI: 10.1016/S0967-0637(00)00080-7

PARTELLI, F.L.; ARAÚJO, A.V.; VIEIRA, H.D.; DIAS, J.R.M.; MENEZES, L.F.T.; RAMALHO, J.C. Microclimate and development of 'Conilon' coffee intercropped with rubber trees. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 11, p. 872-881, 2014. doi: 10.1590/S0100-204X2014001100006

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970. doi: 10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Brasília: Embrapa, 2002.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 2008. ISBN: 978-85-85564-19-3

PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C.A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta Model. **Theoretical and applied climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, 2010. doi: 10.1007/s00704-009-0123-z

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JUNIOR, M.J.; CAMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Exigência térmica do café Arábica cultivar Mundo Novo no subperíodo florescimento-colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1781-1786, 2008.

- PICINI, A. G.; CAMARGO, M. B. P.; ORTOLANI, A. A.; FAZUOLI, L. C.; GALLO, P. B. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p.157-170, 1999.
- PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JUNIO, R. J.; EVANGELISTA, S. E. M.; OTAVIAN, A. F.; ÁVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B. A., MARIN, F., MACEDO JUNIOR, C.; PELLEGRINO, G.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa-Cepagri, São Paulo, 2008.
https://www.macroprograma1.cnpqia.embrapa.br/scaf/publicacoes/CLIMA_E_AGRICULTURA_BRASIL_300908_FINAL.pdf/view. Acesso em: 09 fev. 2012.
- PIRES, G. F. **Climate change and the sustainability of agricultural productivity in Brazil**. 2015. 97 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015. Disponível em:
<http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7491/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 de set. 2016.
- RAMALHO, J.C.; RODRIGUES, A.P.; SEMEDO, J.N.; PAIS, I.P.; MARTINS, L.D.; SIMÕES-COSTA, M.C.; LEITÃO, A.E.; FORTUNATO, A.S.; BATISTA-SANTOS, P.; PALOS, I.M.; TOMAZ, M.A.; SCOTTI-CAMPOS, P.; LIDON, F.C.; DAMATTA, F.M. Sustained photosynthetic performance of *Coffea* spp. Under long-term enhanced [CO₂]. **PLoS ONE**, v.8, e82712, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0082712.
- RAMIREZ, G.M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Comparação de dados dos satélites Ikonos-II e Landsat/ETM+ no estudo de áreas cafeeiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.4, p.661-666, abr., 2006.
- RANJITKAR, S.; SUJAKHU, N. M.; MERZ, J. KINDT, R.; XU, J.; MATIN, M. A.; ALI, M.; ZOMER, R. J. Suitability Analysis and Projected Climate Change Impact on Banana and Coffee Production Zones in Nepal. **PloS one**, v. 11, n. 9, p. e0163916, 2016.
doi:10.1371/journal.pone.0163916
- REZENDE, L. F. C. et al. Is the maximum velocity of carboxylation (V_{cmax}) well adjusted for deciduous shrubs in DGVMs? A case study for the Caatinga biome in Brazil. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2016a.
- REZENDE, L. F. C. et al. Calibration of the maximum carboxylation velocity (V_{cmax}) using data mining techniques and ecophysiological data from the Brazilian semiarid region, for use in Dynamic Global Vegetation Models. **Brazilian Journal of Biology**, v. 76, n. 2, p. 341-351, 2016b.
- RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; OLIVEIRA, N. G. Utilização de componentes principais para analisar o comportamento do cafeeiro a pleno sol e sombreado. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 44-54, jan./abr. 2011.

RODRIGUES, W. P et al. Long-term elevated air [CO₂] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical Coffea arabica and C. canephora species. **Global change biology**, v. 22, n. 1, p. 415-431, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13088

ROSA, V. G. C. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do estado de Minas Gerais**. 2007. 145p. (INPE-14791-TDI/1234). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos-SP, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.12.19.35>>.

ROSA, V. G. C.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

SAHA S., et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1057, 2010. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1

SANTOS, M. A. dos; CAMARGO, M. B. P. de. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, v.65, p.173-183, 2006.

SANTOS, A. A. **Desenvolvimento e Avaliação de um Modelo Mecanístico para a Estimativa da Produtividade da Cultura do Cafeeiro**. 2002, 43p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996. ISSN 0104-1347.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSÉS, F. A. Yield Gap –Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, On-line, N° 155, 2016. Disponível em: <http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/issue/IA-BRASIL-2016-155>. Acesso em: 01 de mai. 2017
SILVA, E. A. D. **Influence of climate, fire and phosphorus in the dynamics of vegetation in the Amazon-Cerrado border simulated with INLAND model**. 2015. 95 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015. Disponível em: <http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7491/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 de set. 2016.

SILVA, E. A. D. **Influence of climate, fire and phosphorus in the dynamics of vegetation in the Amazon-Cerrado border simulated with INLAND model**. 2015. 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015. Disponível em:

<http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7491/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 de set. 2016.

SILVA, B. A. O.; REIS, E. A. A bienalidade da cafeicultura e o resultado econômico da estocagem. **Custos e @gronegocio on line** - v. 9, n. 3, 2013. ISSN 1808-2882

SILVEIRA, H. R. O. et al. Impactos da deficiência hídrica nas respostas ecofisiológicas e espectrais do cafeeiro consorciado com espécies madeireiras. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 318 - 328, jul./set. 2016

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CAFÉ DO ESTADO DE MINAS GERAIS (SINDICAFÉ-MG). **Catálogo café e pesquisa** - café no mundo. 2004. Disponível em: <http://sindicafe-mg.com.br/plus/modulos/conteudo/?tac=cafe-no-mundo>. Acesso em: 9 abr. 2016.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, v. 78, p. 151- 164, 2002. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00118-1

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v. 92, p. 291-303, 2005. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.01.022

SMITH, N. G.; DUKES, J. S. Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO₂. **Global Change Biology**, v. 19, n. 1, p. 45-63, 2013. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02797.x

SOUSA, A. O.; SOUZA, A. L. F.; PIFFER, T. R. O.; AMARAL, G. M.; SANTOS, E. C.; SOUZA, L. M. M.; OLIVEIRA, C. C. Geoprocessamento e sensoriamento remoto como subsídio à previsão de safra de café no Extremo Oeste Baiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 15., 2011, Curitiba PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011.

SOUZA, V. C. O.; VIEIRA, T. G. C.; VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R. Espacialização e dinâmica da cafeicultura mineira entre 1990 e 2008, utilizando técnicas de geoprocessamento. **Coffee Science**, v. 7, n. 2, p. 122-134, 2012.

SOUZA, R. B. Engenheiro agrônomo – RTV Adama Brasil. **Taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados no cafeeiro**. Comunicação pessoal, 2016.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O. **Production functions and predicted irrigation programmes for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency: final report**. Washington: U.S. Department of Interior, 80 p. 1976.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2001. 719p.

TARDIN, A. T.; ASSUNÇÃO, G. V.; SOARES, J. V. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.9, p.1355-1361, set.,1992.

TROPICAL COMMODITY COALITION – TCC. **Coffee Barometer**. The Hague: TCC, 2012.

THOMAZIELLO, R. A.; FAZUOLI, L. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C. Café arábica: cultura e técnicas de produção. **Boletim Técnico-Instituto Agrônômico de Campinas**. Campinas: Embrapa Tabuleiros Costeiros (CPATC), n. 187, 2000. 82 p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1957.

TOSELLO, A. O ponto de armazenamento do café em côco. **Bragantia**, v. 11, n. 4-6, p. 171-177, 1951.

TOSELLO, R.N.; ARRUDA, H.V. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica, no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, 449-465 p. 1962.

TOURIGNY, E. **Multi-scale fire modeling in the neotropics: coupling a land surface model to a high-resolution fire spread model, considering land cover heterogeneity**. 2014. 183p. IBI: <8JMKD3MGP5W34M/3GD37Q2>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.30.00.36-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos-SP, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD37Q2>>.

TOZZI, F. R. O; GHINI, R. Impacto do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono sobre a ferrugem e o crescimento do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 8, p. 933-941, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000800005

TWINE, Bryant, J. J.; Richter, K. T.; BERNACCHI, C. J.; MCCONNAUGHAY, K. D., MORRIS, S. J.; LEAKEY, A. D. Impacts of elevated CO₂ concentration on the productivity and surface energy budget of the soybean and maize agroecosystem in the Midwest USA. **Global change biology**, v. 19, n. 9, p. 2838-2852, 2013.

TWINE, T. E.; KUCHARIK, C. J. Evaluating a terrestrial ecosystem model with satellite information of greenness. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. G3, 2008. DOI: 10.1029/2007JG000599

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. Mecanismos de aclimatação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, v. 45, n. 9, p. 1564-1571, 2015. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140527

WINTGENS, J. N. **Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders, and researchers.** WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. ISBN: 978-3-527-33253-3

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518

ZHAO, Q.; BLACK, T. L.; BALDWIN, M. E. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at NCEP. **Weather and forecasting**, v. 12, n. 3, p. 697-712, 1997. DOI: 10.1175/1520-0434(1997)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2

ZULLO, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. **Meteorological Applications**, v. 13, n. S1, p. 69-80, 2006. doi:10.1017/S135048270600257X

APÊNDICE A: Arquivos modificados no Modelo INLAND

Tabela A.1 – Arquivos modificados no Modelo Integrado de Processos Superficiais (INLAND) para implementação do cafeeiro arábica e para realizar rodadas do modelo em alta resolução.

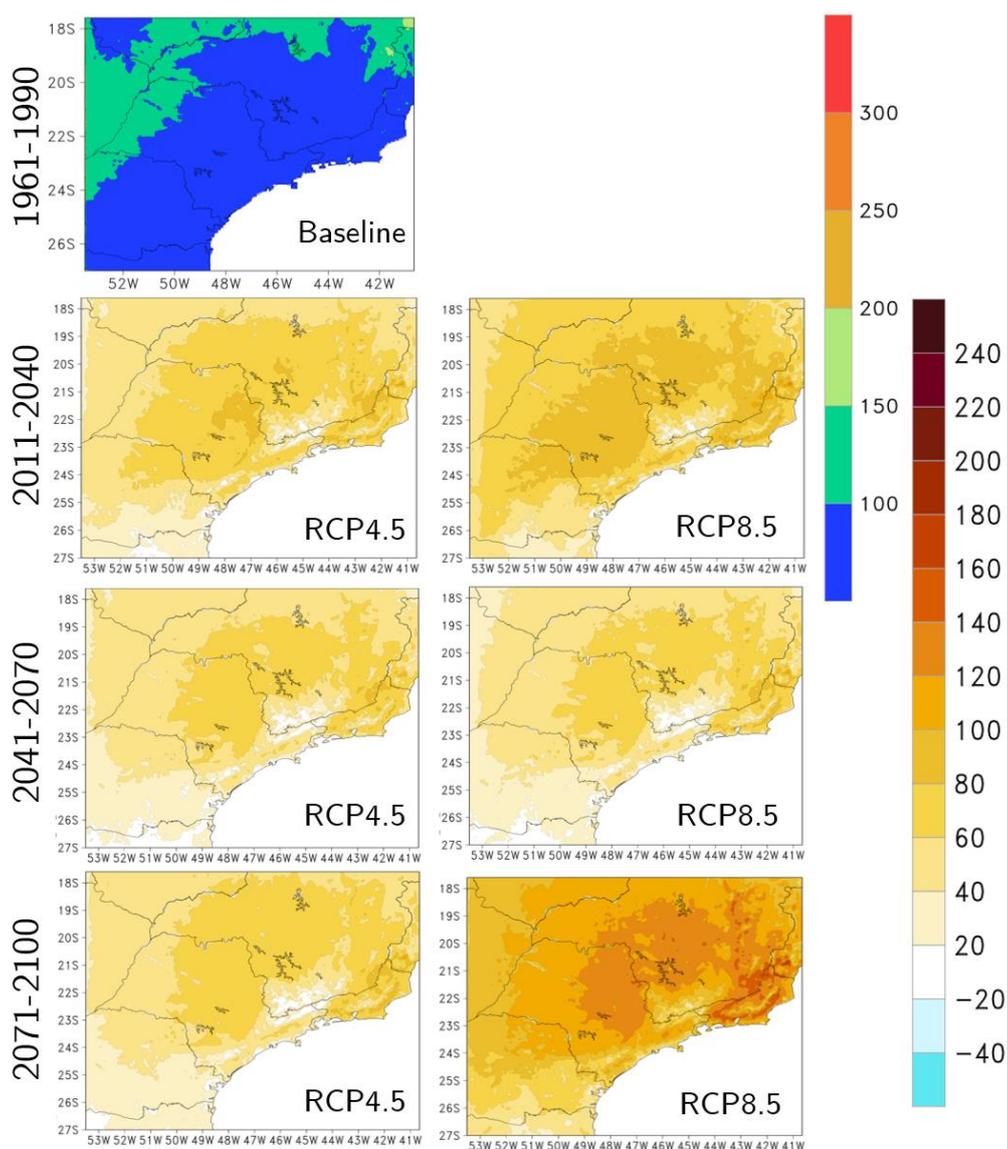
Diretório	Arquivo
/include	inland_compar.h
/conf	inland-grid.domais inland-grid.infile
/params	canopy_crop crop vegetation_crop
/src	inland_alloc inland_comcrop inland_comdiag inland_compft inland_comveg inland_cropr residue inland_cropupdate inland_daily inland_dailymet inland_dailymon inland_dynaveg inland_existence inland_iniveg inland_nitrostress inland_parameters inland_phenocrop inland_planting inland_rdparam inland_stomataib inland_sumday inland_sunnow inland_sumonth inland_sumyear inland_turvap inland_vegmap inland_wdiag inland_wrestart inland_wyearly

Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE B: Projeções espaciais das mudanças médias (2011-2100)

B.1 Deficiência hídrica

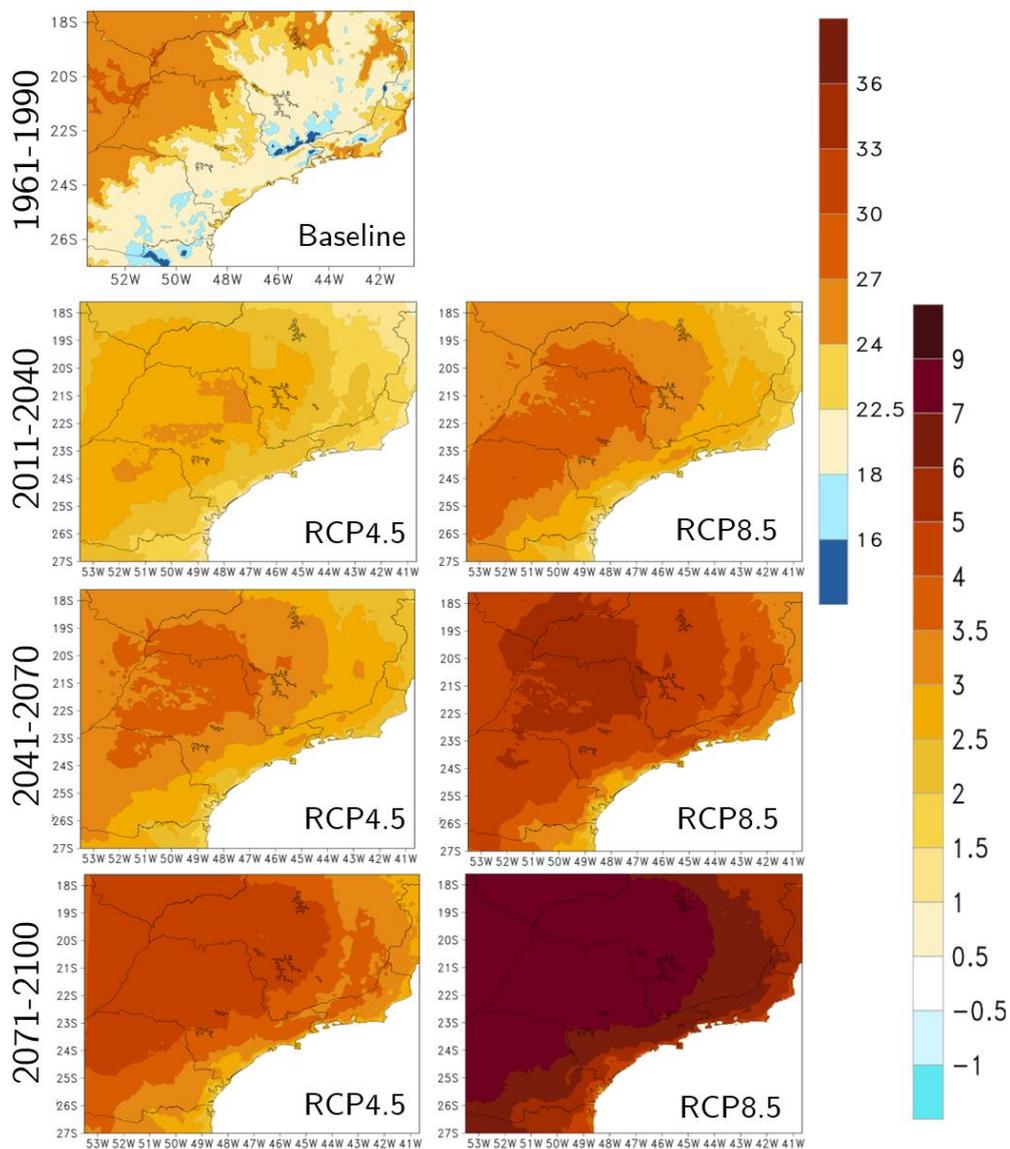
Figura B.1 – Média anual da deficiência hídrica (mm) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.2 Temperatura média do ar

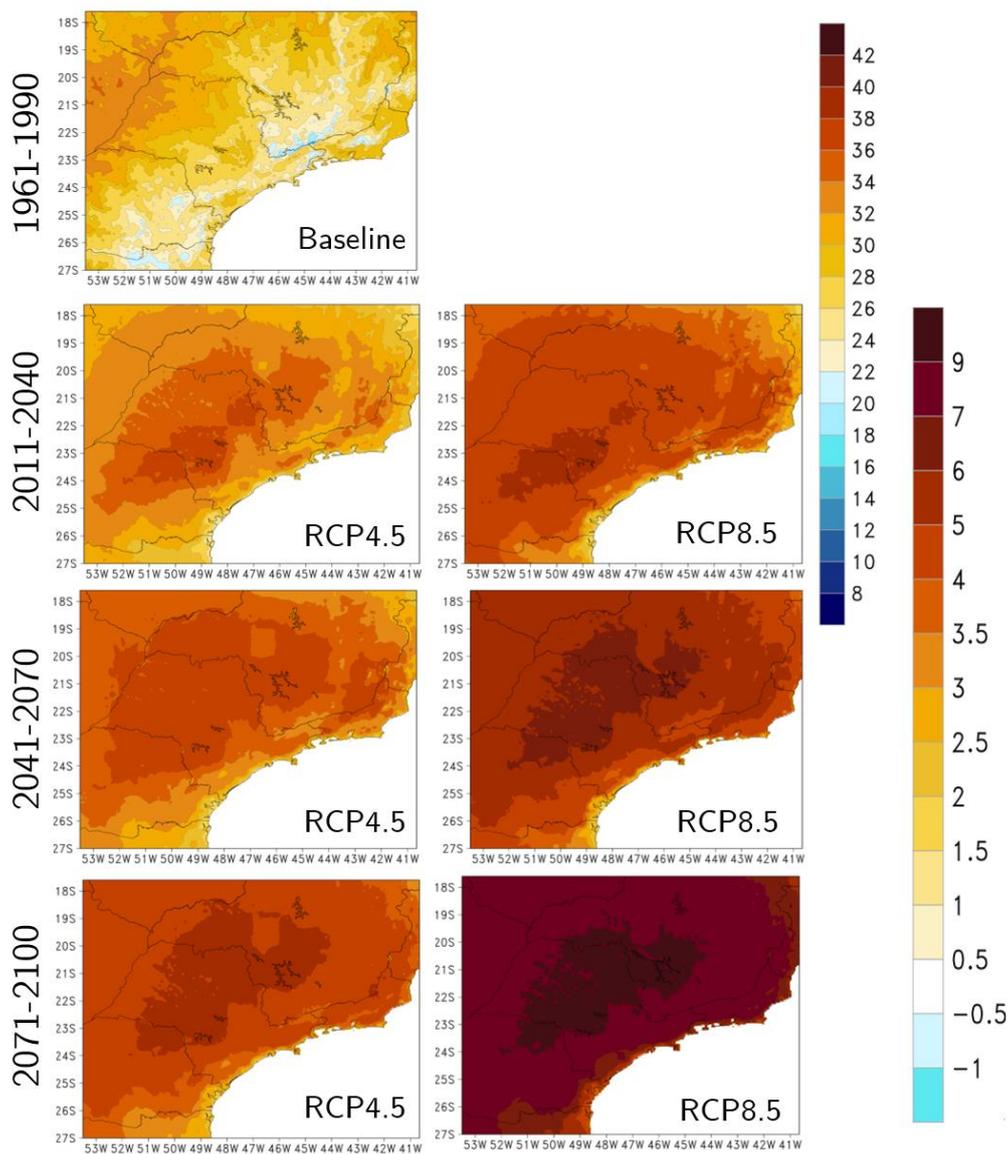
Figura B.2 – Média anual da temperatura a 2 m (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.3 Temperatura máxima do ar

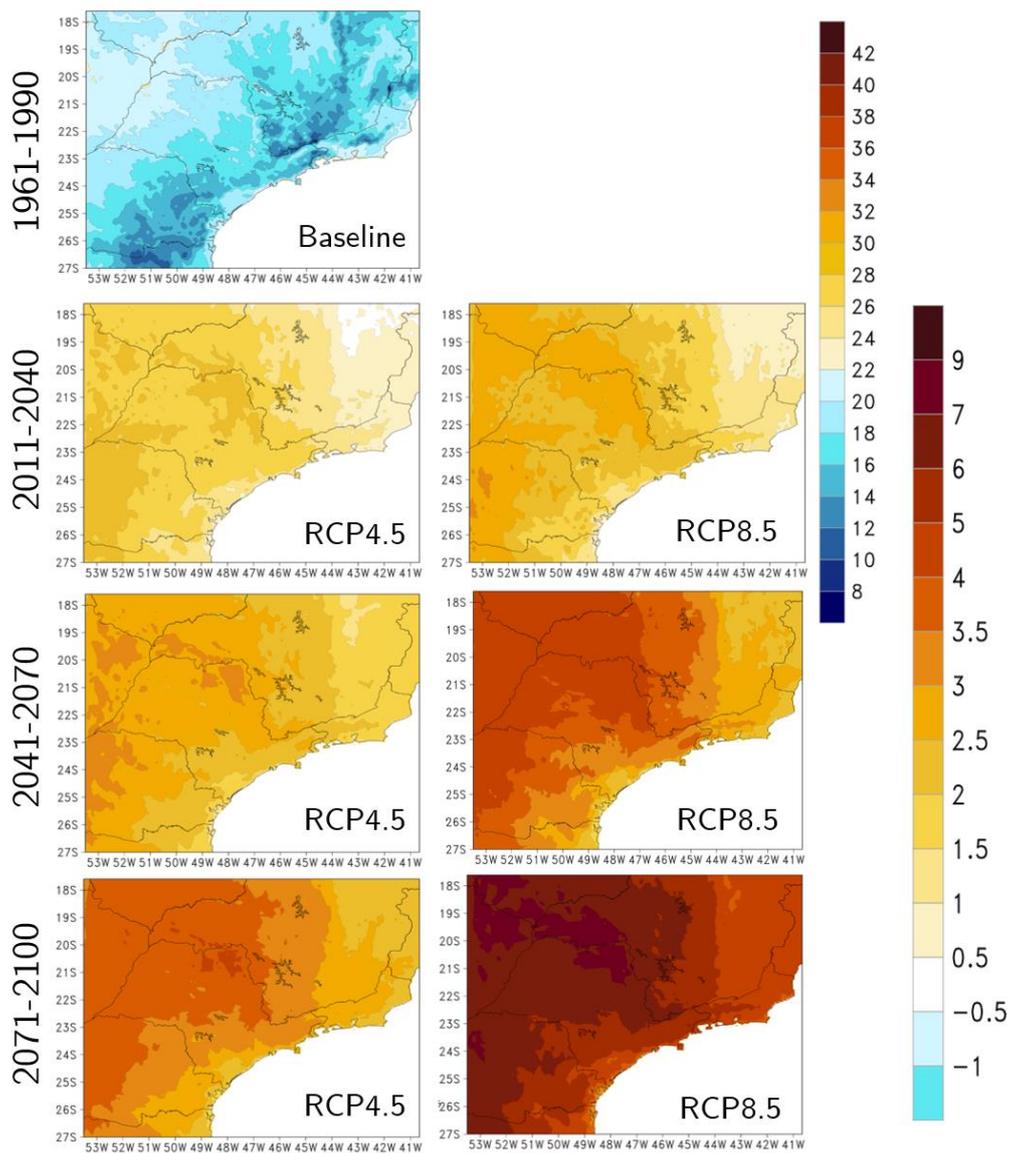
Figura B.3 – Média anual da temperatura máxima do ar (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.4 Temperatura mínima do ar

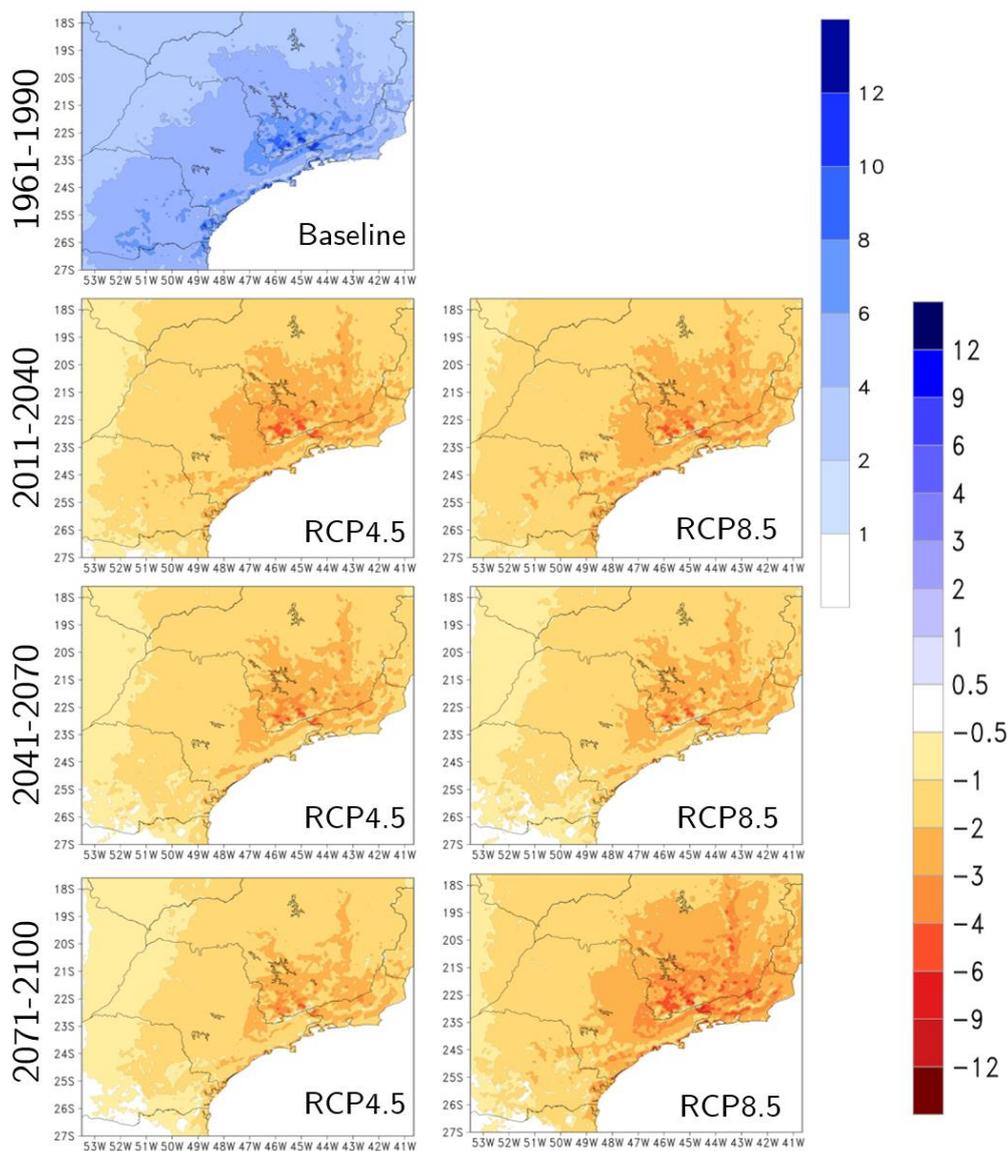
Figura B.4 – Média anual da temperatura mínima do ar (°C) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.5 Precipitação

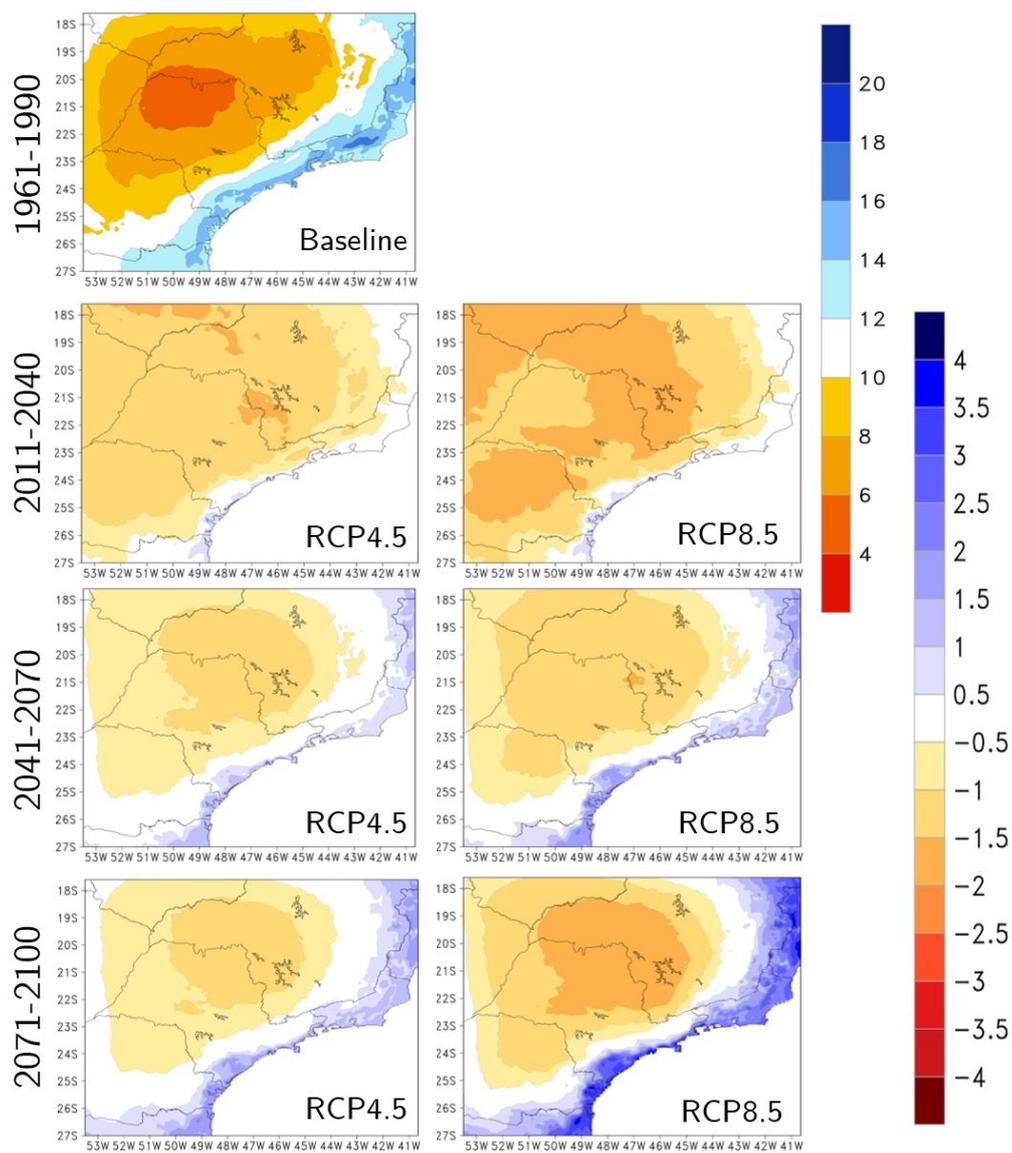
Figura B.5 – Média anual da precipitação (mm/dia) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.6 Umidade específica

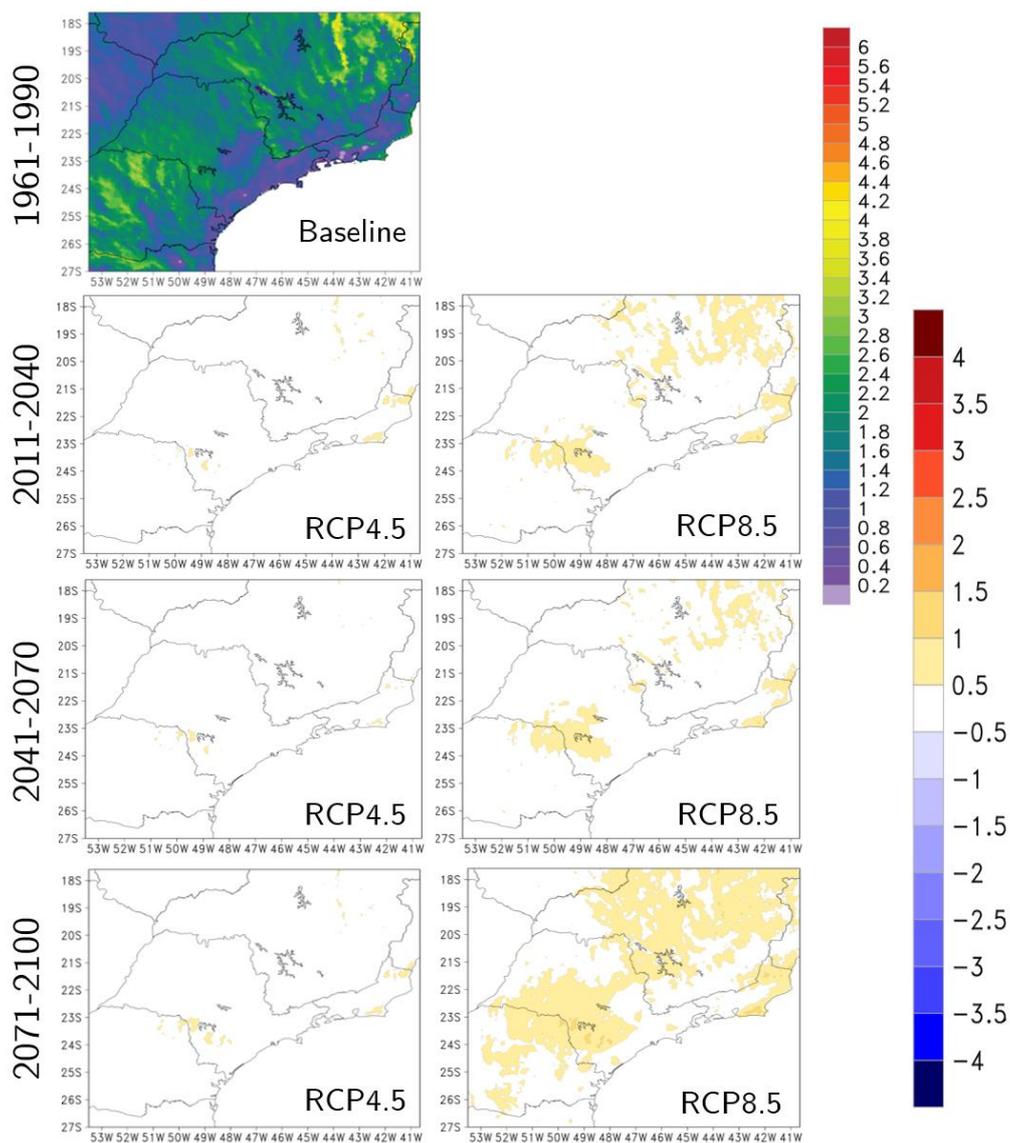
Figura B.6 – Média anual da umidade específica (g/kg) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.7 Velocidade do vento a 10 m

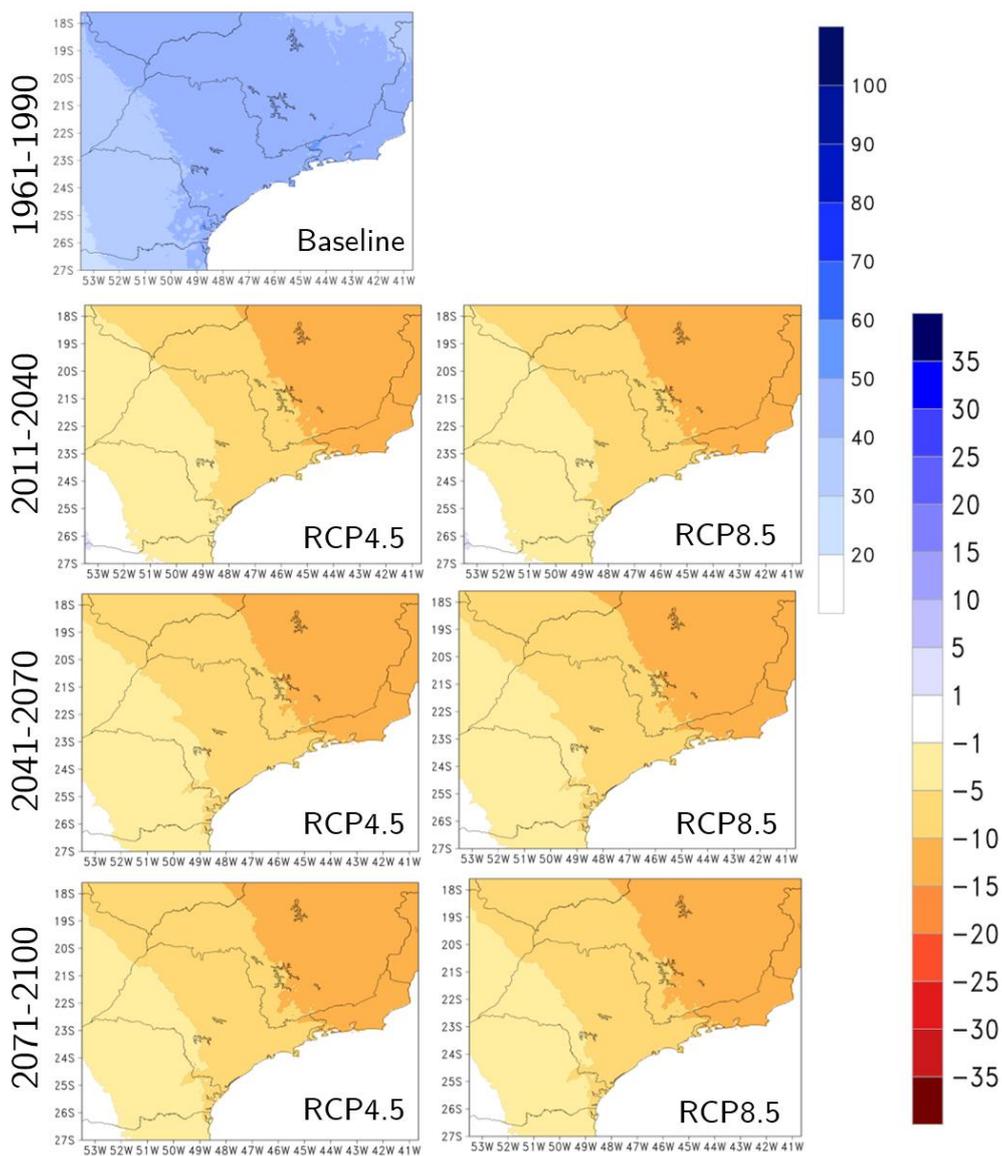
Figura B.7 – Média anual da velocidade do vento a 10 m (m/s) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.

B.8 Cobertura de nuvem

Figura B.8 – Média anual da cobertura de nuvem (%) simulada pelo Modelo Eta-HadGEM em 5 km para o período *baseline* e os campos da diferença entre os *timeslices* futuros, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, e o período *baseline*.



Fonte: Produção da autora.