



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/11.08.01.16-TDI

ANÁLISE DE VARIÁVEIS ARGOMETEOROLÓGICAS E ESPECTRAIS NO APRIMORAMENTO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO CAFÉ

Sulimar Munira Caparoci Nogueira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Maurício Alves Moreira, e Margarete Marin Lordelo Volpato, aprovada em 26 de novembro de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3S6SJKS>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

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

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

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

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

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/11.08.01.16-TDI

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS ARGOMETEOROLÓGICAS E
ESPECTRAIS NO APRIMORAMENTO DE MODELOS
DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA
DO CAFÉ**

Sulimar Munira Caparoci Nogueira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Maurício Alves Moreira, e Margarete Marin Lordelo Volpato, aprovada em 26 de novembro de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3S6SJKS>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nogueira, Sulimar Munira Caparoci.

N689a Análise de variáveis argometeorológicas e espectrais no aprimoramento de modelos de estimativa da produtividade da cultura do café / Sulimar Munira Caparoci Nogueira. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxiv + 142 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/11.08.01.16-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Maurício Alves Moreira, e Margarete Marin Lordelo Volpato.

1. Dados de sensoriamento remoto. 2. Modelagem de culturas.
3. Índice de vegetação. I.Título.

CDU 528.8:633.73



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): *Sulimar Munira Caparoci Nogueira*

Título: "ANÁLISE DE VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS E ESPECTRAIS NO APRIMORAMENTO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO CAFÉ"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em *Sensoriamento Remoto*

Dra. Ieda Del' Arco Sanches

Ieda Del'Arco Sanches

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Maurício Alves Moreira

Maurício Alves Moreira

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato

Margarete Marin Lordelo Volpato

Orientador(a) / EPAMIG / Belo Horizonte - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Flávio Jorge Ponzoni

Flávio J. Ponzoni

Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Renata Ribeiro do Valle Gonçalves

Renata R. V. Gonçalves

Convidado(a) / CEPAGRI/UNICAMP / Campinas - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de *Doutor(a)* em
Sensoriamento Remoto

Dr. Marcelo de Carvalho Alves



Convidado(a) / UFLA / Lavras - MG

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

"O otimista e o pessimista vão morrer da mesma maneira, mas vão viver vidas totalmente diferentes."

Paulo Coelho

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai João, às minhas irmãs Samira e Angela e às minhas sobrinhas Gabi e Anna.

Ao Doutor Mauricio A. Moreira pela amizade, orientação e confiança depositada em mim.

A Dra. Margarete M. L. Volpato, por aceitar participar da orientação e pelo apoio e incentivos para que esta pesquisa fosse realizada.

Aos meus queridos amigos Renato Serra, Gabriela Morello, Marcelo Mitsumoto, Gabriel Bertani, Guilherme Mataveli, Bruno Oliveira e Bruno Schultz pela amizade e respeito.

Agradecimentos aos queridos amigos Emília Hamada, Tadeu Lana e Elias pela amizade, conselhos e apoio sempre.

À Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE pela oportunidade de desenvolvimento e realização do estudo e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo parametrizar modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativas de produtividade para a cultura do café. Foram utilizados: Índice de Área Foliar (IAF) estimado a partir de índices de vegetação obtidos de sensoriamento remoto; dados de precipitação do modelo ETA/CPTEC, CHIRPS e TRMM; mapa de solo; mapa altimétrico (TOPODATA); e dados específicos da cultura. Primeiramente, a metodologia foi aplicada no âmbito de propriedade utilizando dados da fazenda da Conquista (Alfena-MG). Além desta propriedade o modelo foi também testado nos âmbitos de municípios e de mesorregiões. No nível de fazenda, utilizando IAF estimado a partir de dados do sensor MODIS e o modelo baseado em Doorenbos e Kassam (1979), as diferenças relativas entre as produtividades modeladas e as produtividades de campo foram de -0,1%, 1,1%, -2,8%, -3,7% e 5% para os anos-safra 2010/11, 2011/12, 2012/13, 2013/14 e 2014/15, respectivamente. Com a utilização do modelo agrometeorológico-espectral baseado em Picini (1998), as diferenças relativas entre os dados modelados e de campo no período de 2011/12, 2012/13, 2013/14 e 2014/15, as diferenças foram de 5,3%, -2,4%, -5,8% e 0,0%, respectivamente. Ao nível de mesorregião o modelo baseado em Doorenbos e Kassam (1979) as diferenças relativas entre a produtividade modelada e o IBGE foram de 18,1%; -12%; -7,4%, 10,3% e -5,3, respectivamente. Na aplicação do modelo na microrregião, as diferenças relativas entre a produtividade modelada e a fornecida pelo IBGE variaram entre -15% e 10%. Na análise da produtividade nos municípios pertencentes à microrregião de Alfenas, observou-se que as diferenças relativas variaram entre 1,2% a 55,3%, maiores do que aquelas encontradas nas escalas regionais. Foi possível estimar a produtividade tanto em nível de fazenda quanto em escala regional e os resultados reforçam a ideia de que é possível utilizar a modelagem agrometeorológica-espectral na estimativa de produtividade do cafeeiro com boa precisão. Entretanto há a necessidade de aprimoramento do método proposto em escala municipal.

Palavras-chave: Dados de sensoriamento remoto. Modelagem de culturas. Índice de vegetação.

**ANALYSIS OF AGROMETEOROLOGICAL AND SPECTRUM VARIABLES
FOR IMPROVING COFFEE CROP PRODUCTIVITY MODELLING
ESTIMATE**

ABSTRACT

The objective of this work was to parameterize the agrometeorological-spectral models of productivity for coffee crops. We used the leaf area index (LAI), which was estimated from vegetation indices obtained through remote sensing; data from the ETA, CHIRPS and TRMM precipitation data; soil map; elevation map (TOPODATA); and crop-specific data. The methodology was applied at the farm level, at the Conquista coffee plantation (Alfenas, Minas Gerais). Besides this farm, the model was also tested at the municipal and mesoregional levels. At the plantation level, using LAI estimated from MODIS sensor data and the model based on Doorenbos and Kassam (1979), the relative differences between the modeled yield and the field productivity were -0.1%, 1.1%, -2.8%, -3.7% and 5% for the crop years 2010/11, 2011/12, 2012/13, 2013/14 and 2014/15, respectively. Using the agrometeorological-spectral model based on Picini (1998), the relative differences between the modeled data and the field data for the crop years 2011/12, 2012/13, 2013/14 and 2014/15 were 5.3%, -2.4%, -5.8% and 0.0%, respectively. At the mesoregional level, using the model based on Doorenbos and Kassam (1979), the relative differences between the modeled productivity and the IBGE data were 18.1%, -12%, -7.4%, 10.3% and -5.3, respectively. Applying the model at the mesoregional level, the relative differences between the modeled productivity and the data available from IBGE varied between -15% and 10%. The analysis of productivity in the municipalities within the microregion of Alfenas showed that the relative differences varied between 1.2% and 55.3%, greater than those found at the regional scales. The obtained results are satisfactory at the farm as well as the regional scales and they support the idea that it is possible to use agrometeorological-spectral modeling to estimate the productivity of coffee crops with good precision. However there is still room for improvement of the proposed method at the municipal level.

Key words: Remote sensing data. Crop modeling. Vegetation indices.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 Principais países produtores de café – em porcentagem (%) de produção mundial.	5
Figura 3.2 Principais Estados produtores de café – em porcentagem (%) de produção nacional.	6
Figura 3.3 Porcentagem da produção de café em Minas Gerais por mesorregiões produtoras - safras 2008/2009 a 2014/2015.	7
Figura 3.4 Contribuição percentual das microrregiões na produção de café na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas - safras 2008/2009 a 2014/2015.	7
Figura 3.5 Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro Arábica.	8
Figura 3.6 Escala para determinação de estádios fenológicos do café arábica.	11
Figura 4. 1 Localização da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas e da microrregião de Alfenas.	29
Figura 4. 2 Localização da fazenda Conquista em Alfenas – MG.	30
Figura 4.3 Diagrama esquemático representando os dados empregados na pesquisa.	31
Figura 4.4 Diagrama esquemático representando as etapas metodológicas realizadas na aplicação dos dados NDVI/MODIS.	32
Figura 4.5 Localização espacial das estações meteorológicas.	35
Figura 4.6 Teste de combinação das fases cafeeiras para determinação da produtividade.	45
Figura 5.1 Análise estatística entre as temperaturas observadas nas estações meteorológicas e as temperaturas estimativas ETA: (a) Média dos erros absolutos (MAE; °C), (b) Média dos erros (MBE; °C), (c) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE; °C) e (d) Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE; %).	49
Figura 5.2 Temperaturas (a) mínima (°C), (b) média (°C) e (c) máxima (°C) do ETA versus as observações do INMET para os anos safra de: (1) 2009/10, (2) 2010/11, (3) 2011/12, (4) 2012/13, (5) 2013/14 e (6) 2014/15.	50
Figura 5.3 Análise estatística entre a radiação de estações meteorológicas e a estimativa ETA: (a) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE) e Média dos erros (MBE) em MJ.m ⁻² .dia ⁻¹ e (b) Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRSME; %).	53
Figura 5.4 Radiação de onda curta incidente (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹) do ETA versus as observações do INMET para os anos safra de: (a) 2009/10, (b) 2010/11, (c) 2011/12, (d) 2012/13, (e) 2013/2014 e (f) 2014/15.	54
Figura 5.5 Distribuição da precipitação acumulada observados em: (a) catorze estações meteorológicas do INMET e estimada pelo (b) ETA, (c) TRMM e (d) CHIRPS entre julho/2009 a junho/2015, para a região Sul/Sudoeste de Minas – MG.	56

Figura 5.6 Distribuição da precipitação acumulada média estimada pelo ETA, TRMM, CHIRPS e em catorze estações meteorológicas do INMET, entre julho/2009 a junho/2015, para a região Sul/Sudoeste de Minas – MG.	57
Figura 5.7 Precipitação (mm) do INMET versus as estimativas de precipitação do ETA, TRMM e CHIRPS por ano safra.	58
Figura 5.8 (1) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), Média dos erros (MBE), Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRSME; %) e Média dos erros percentual (PB; %); (2) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF) e coeficiente de correlação (R) entre a precipitação (PREC) de estações meteorológicas e estimada para o (a) ETA, (b) TRMM e (c) CHIRPS.	60
Figura 5.9 Variações sazonais (1) PB e rRMSE e (2) EFF e R por períodos (DJF, SON, JJA e MAM) entre a precipitação de estações meteorológicas e estimada pelo (a) ETA, (b) TRMM e (c) CHIRPS.	63
Figura 5.10 Valores médios da deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) estimados através do Balanço hídrico climatológico com uso de dados observados em estações meteorológicas do INMET e dos dados ETA, TRMM, CHIRPS, no período de Julho/09 a Junho/15.	65
Figura 5.11 Valores médios de evapotranspiração real (ET_r) estimados através do Balanço hídrico climatológico com uso de dados do INMET e dos dados ETA, TRMM, CHIRPS, no período de Julho/09 a Junho/15.	67
Figura 5.12 Análise estatística: (1) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF) e (2) Média dos erros (MBE) por períodos (DJF, SON, JJA e MAM) determinados para (a) Déficit hídrico, (b) Excedente hídrico e (c) Evapotranspiração real.	69
Figura 5.13 Mapas de (a) orientação de vertente, (b) declividade e (c) altitude (m) da fazenda Conquista.	71
Figura 5.14 Porcentagem das lavouras cafeeiras segundo as classes de altitude (a) e declividade (b) na Fazenda Ipanema.	71
Figura 5.15 Porcentagem das lavouras cafeeiras segundo as classes de orientação de vertente na Fazenda Ipanema.	72
Figura 5.16 Variação temporal média do NDVI (μ) e desvio padrão (σ) ao longo do ciclo fenológico do café nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015. O ciclo fenológico compreende: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.	73
Figura 5.17 Variação temporal média do Índice de Área foliar (μ) e desvio padrão (σ) ao longo do ciclo fenológico do café nos anos safra de 2010/11 a 2014/15 dos modelo (a) Choudhury et al. (1994), (b) Jiménez-Muñoz et al. (2005), (c) Taugourdeau et al. (2014) e (d) Silva et al. (2015). O ciclo fenológico compreende as fases de repouso (Estádio I), floração e chumbinho (Estádio II), granação (Estádio III) e maturação (Estádio IV).	74

Figura 5.18 Fator de produtividade agrícola para os anos de alta (a) e baixa (b) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras utilizando modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979).....	76
Figura 5.19 Os coeficientes de determinação (R^2) (a) e os erros MAE (b), MBE (c) e rRMSE (d) obtidos da relação entre produtividade real obtida em campo e a produtividade modelada com uso do modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras.	77
Figura 5.20 Fator de produtividade agrícola (F_{PA}) e o coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior (<i>kyo</i>) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras utilizando modelo agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998).....	80
Figura 5.21 Os coeficientes de determinação (R^2) (a) e os erros MAE (b), MBE (c) e rRMSE (d) obtidos da relação entre produtividade real obtida em campo e a produtividade modelada pelo método agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras.....	81
Figura 5.22 Fases fenológicas do café em relação aos regimes pluviométricos e temperaturas (máxima, média e mínima do ar) na região Sul/Sudoeste de Minas nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.	83
Figura 5.23 Variações da temperatura (máxima, média e mínima) durante as fases fenológicas do café, para o período de jun/2010 a maio/2015.	84
Figura 5.24 Série temporal da precipitação média e NDVI médio e fases fenológicas do café no período de 2010/11 a 2014/15.	85
Figura 5.25 Produtividades anuais de café ($kg \cdot ha^{-1}$) para: Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas (MESO), Microrregião de Alfenas (MICRO), Município de Alfenas (MUNI) e fazenda da Conquista.	86
Figura 5.26 Variação percentual da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral nos anos safra de (a) 2010/11, (b) 2011/12, (c) 2012/13, (d) 2013/14 e (e) 2014/15.	90
Figura 5.27 Valores do fator de resposta da produção (k_y) e índice de penalização parcial (IP) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura por período e fase fenológica cafeeira: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.	91
Figura 5.28 Histograma da produtividade agrícola cafeeira estimada a partir de uma amostra ($n = 304$) de pixel puro na mesorregião de Sul/Sudoeste de Minas nos anos agrícolas de 2010/11 a 2014/15.	93

Figura 5.29 Produtividade modelada (MOD) e produtividade do IBGE para a microrregião de Alfenas nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015.	94
Figura 5.30 Estimativas de produtividade modelada (a esquerda – índice 1) e diferença relativa entre a produtividade modelada e a referência (a direita – índice 2) para os municípios pertencentes à microrregião de Alfenas nos anos safra (a) 2010/11; (b) 2011/12; (c) 2012/13; (d) 2013/14 e (e) 2014/15.	96
Figura F.1 Distribuição do armazenamento máximo de água no solo (mm) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas baseado em Rizzi (2004).	136
Figura F.2 Modelo digital de elevação para a Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas (SRTM/ 90m).	136
Figura F.3 Mapa de biomas da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.	137
Figura F.4 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2010/2011.	138
Figura F.5 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2011/2012.	139
Figura F.6 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2012/2013.	140
Figura F.7 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2013/2014.	141
Figura F.8 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2014/2015.	142

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 Localização das Estações Meteorológicas.....	35
Tabela 4.2 Disponibilidade (✓) de dados por estação meteorológica.....	36
Tabela 4.3 Data de aquisição das imagens MOD13Q1/Terra e estágio fenológico do cafeeiro.....	39
Tabela 4.4 Equações utilizadas na determinação do índice de área foliar do cafeeiro.....	42
Tabela 4.5 Valores do fator de resposta da produção (k_y) por período e fase fenológica cafeeira.....	44
Tabela 5.1 Coeficientes de determinação (R^2), Média dos erros absolutos (MAE), média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) para as temperaturas máxima, média e mínima no período de jul/09 a jun/15.....	51
Tabela 5.2 Coeficientes de determinação (R^2), Média dos erros absolutos (MAE), média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) para a radiação de onda curta incidente no período de jul/09 a jun/15.....	55
Tabela 5.3 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para a precipitação no período de jul/09 a jun/15.....	61
Tabela 5.4 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para os déficit (DEF) e excedente (EXC) hídrico no período de jul/09 a jun/15.....	66
Tabela 5.5 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para a evapotranspiração real no período de jul/09 a jun/15.....	68
Tabela 5.6 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) com o IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4.....	79
Tabela 5.7 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo método de Piccini (1998) com o IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4.....	82
Tabela 5.8 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo método agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998) com o IAF obtido através da equação de Taugourdeau et al. (2014) para a combinação 4.....	82

Tabela 5.9 Produtividade média e diferença relativa entre a produtividade estimada pelo IBGE e a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.	87
Tabela 5.10 Produtividade agrícola média, variância da média, desvio padrão da média e coeficiente de variação obtidos por amostragem aleatória simples (n = 304).	93
Tabela 5.11 Sensibilidade do modelo aos dados de radiação de onda curta incidente (RAD), dados de temperatura máxima (TMAX) e temperatura mínima (TMIN)	98
Tabela A. 1 Equações para adequação dos dados meteorológicos provenientes do modelo ETA	121
Tabela B. 1 Taxa de produção de matéria seca (t_m) para cultura do café (Planta C3) em função da temperatura média do ar (T_{med}).....	124
Tabela B. 2 Taxa de produção de matéria seca em dias claros (t_c) e em dias nublados (t_n).....	124
Tabela E. 1 Temperatura máxima média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas	131
Tabela E. 2 Temperatura máxima na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas	132
Tabela E. 3 Temperatura mínima média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas	133
Tabela E. 4 Temperatura mínima na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas	134
Tabela E. 5 Temperatura média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas	135

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria de Café
AGF	Asymmetric Gaussian Function
BHS	Balanço hídrico sequencial
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation
Clim	Climatological
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPC	Climate Prediction Center
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMD	Empirical Mode Decomposition
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FRB	Fator de Reflectância Bidirecional
GD	Grau-dia
GFS	Global Forecast System
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GRART	Geometrically Regular Arbitrary Radiative Transfer
HANTS	Harmonic Analysis of NDVI Time-Series
HDF	Hierarchy Data Format
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICSSA	Iterative Caterpillar Singular Spectrum Analysis
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JAXA	Japan Aerospace Exploration
LaSRC	Landsat Surface Reflectance Code
LPF	Low Pass Filtering
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MRT	Modis Reprojection Tools
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCDC	National Climatic Data Center
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OIC	Organização Internacional do café
OLI	Operational Land Imager
PERSIANN	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
SGF	Savitzky–Golay Filter
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSGF	Temporal Smoothing and Gap Filling
USGS	United States Geological Survey

UTC
Whit

Universal Time Coordinated
Whittaker Smoother

LISTA DE SÍMBOLOS

BHS	Balanço hídrico sequencial
CAD	Capacidade de água armazenada
ETM	Evapotranspiração máxima
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Excedente hídrico
k_y	Fator de resposta à produtividade
Y_p	Produtividade potencial
Y_r	Produtividade real
Y_r/Y_p	Produtividade relativa
Q	Estimativa da quebra relativa de produtividade esperada de café
f_{DH}	Fator de penalização por deficiência hídrica
$f \cdot T_{máx}$	Penalização por temperaturas máximas
$f \cdot T_{mín}$	Fator de penalização por temperatura mínima
R	Coefficientes de correlação de Pearson
S	Armazenamento de água
λ	Índices de sensibilidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS GERAIS	4
2.1 Objetivos específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Considerações sobre a cafeicultura	5
3.2 Fenologia do cafeeiro	8
3.3 Modelagem da estimativa de produtividade de culturas	12
3.3.1 Variáveis meteorológicas	19
3.3.2 Características dos dados de sensoriamento remoto	21
3.3.3 Estimativa do índice de área foliar a partir de dados de SR	24
3.3.4 Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Área de estudo	29
4.2 Dados utilizados e abordagem metodológica	31
4.3 Variáveis meteorológicas de entrada do modelo de produtividade e análise de erros	33
4.3.1 Dados meteorológicos modelados e de sensoriamento remoto	33
4.3.2 Dados de estações meteorológicas do INMET	34
4.3.3 Análise das estimativas de variáveis meteorológicas estimadas em relação aos dados INMET	36
4.4 Processamento dos dados NDVI/MODIS	39
4.4.1 Filtragem de dados pelo algoritmo de análise harmônica HANTS	40
4.4.2 Seleção de pixels puros	40
4.5 Determinação da produtividade cafeeira	40
4.6 Análise estatística da produtividade do cafeeiro	45
4.7 Análise de sensibilidade do modelo	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Análise dos erros associados às variáveis meteorológicas	48
5.1.1 Análise da correlação entre dados de temperatura observados e estimados	48
5.1.2 Correlação entre dados observados e estimados de radiação de onda curta incidente	52
5.1.3 Análise dos dados de precipitação estimados pelo modelo numérico ETA e por meio de sistemas de sensoriamento remoto TRMM e CHIRPS	55

5.1.4 Balanço hídrico com base nos dados das estações meteorológicas-----	63
5.2 Uso do NDVI/MODIS para estimar a produtividade do café na fazenda Conquista -----	70
5.2.1 Caracterização do meio físico das áreas cafeeiras -----	70
5.2.2 Análise temporal do índice de vegetação NDVI/MODIS e dos índices de área foliar da cultura cafeeira na fazenda Conquista -----	72
5.2.3 Avaliação dos valores de IAF nas estimativas da produtividade cafeeira-----	75
5.3 Monitoramento da cultura cafeeira na Região Sul/ Sudeste de Minas -----	83
5.3.1 Análise da variação inter e intra anual das variáveis meteorológicas e NDVI/MODIS -----	83
5.3.2 Análise das estimativas de produtividade do café com utilização de dados TRMM-----	85
5.4 Análise de sensibilidade do modelo agrometeorológico-espectral-----	97
6. CONCLUSÕES-----	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	104
APÊNDICE A: VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS -----	121
APÊNDICE B: PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS -----	122
APÊNDICE C: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o) -----	126
APÊNDICE D: BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO -----	128
APÊNDICE E: TABELAS -----	131
APÊNDICE F: MAPAS-----	136

1. INTRODUÇÃO

A América do Sul é a maior região produtora de café, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial do grão e, ao mesmo tempo, o segundo maior consumidor do produto (MAPA, 2017; FAO 2018). Segundo a ABIC (2016), em escala global o Brasil é responsável por cerca de 35% da produção mundial de café; seguido pelo Vietnã, segundo maior produtor, com aproximadamente 15% do mercado internacional. No território brasileiro, Minas Gerais é o maior produtor de café com cerca de 51% da produção nacional de grãos (IBGE, 2016). Neste contexto, nota-se que o acompanhamento da cafeicultura no que diz respeito a área plantada e produção é muito importante e deve ser consistente e obtida antecipadamente, pois o conhecimento do quanto será produzido auxiliaria no planejamento estratégico para atender as demandas de consumo do mercado interno e externo (SANTOS; CAMARGO, 2006; SILVA et al., 2011).

De modo geral, no Brasil, o acompanhamento das safras é realizado de maneira subjetiva através de entrevistas com agricultores ou com entidades relacionadas ao setor agrícola (IBGE, 2002). Tal subjetividade dos sistemas atuais deve-se, em parte, à dinâmica espaço-temporal da atividade agrícola, aliada à grande extensão territorial brasileira, diversidade de tipos de plantio, manejo e variedades, que dificultam a obtenção de informações atualizadas.

Métodos objetivos para a estimativa de produtividade, porém ainda não aplicados como sistema operacional em grande escala, são: (i) os modelos agrometeorológicos (TOSELLO; ARRUDA, 1962; CAMARGO et al., 1984; SILVA et al., 1987; LIU; LIU, 1988; WEILL, 1990; PICINI et al., 1999; CAMARGO et al., 2003; CARVALHO et al., 2004; SANTOS; CAMARGO, 2006; CAMARGO et al., 2007; ZACHARIAS et al., 2008; VICTORINO et al., 2016), (ii) modelos espectrais (TAUGOURDEAU et al. 2014) e (iii) modelos agrometeorológicos-espectrais (ROSA et al., 2010; BERNARDES, 2013; ALMEIDA, 2013).

Os estádios fenológicos do cafeeiro arábica são afetados pelas variações fotoperiódicas e pelas condições meteorológicas, principalmente a disponibilidade hídrica e temperatura do ar (máxima e mínima) durante estádios críticos, que interferem na característica fenológica e, conseqüentemente, na produtividade da cultura e na qualidade do produto (PICINI et al., 1999; CAMARGO; CAMARGO, 2001). Dos fatores fisiológicos, a bienalidade da cultura do café, explicada pela ocorrência simultânea das funções vegetativas e reprodutivas no mesmo ramo, é um dos fatores de maior influência na produtividade da cultura (BEAUMONT, 1939; RENA; MAESTRI, 1985). Uma vez que a produtividade do cafeeiro é afetada pela bienalidade e pelas condições meteorológicas, a estimativa da produtividade implica na elaboração de modelos que considerem os efeitos ambientais aos processos fisiológicos determinantes da produção (CAMARGO, CAMARGO, 2001; SANTOS et al., 2005; CAMARGO, 2010).

Os modelos agrometeorológicos, que antecedem os modelos agrometeorológicos-espectrais, expressam as influências das condições meteorológicas sobre o desenvolvimento da cultura e conseqüentemente, sobre sua produtividade. No modelo agrometeorológico-espectral, a variável espectral, expressa geralmente por meio de índices de vegetação (IVs), pode ser introduzido ao modelo agrometeorológico, podendo expressar tanto os efeitos de fatores ambientais quanto àqueles intrínsecos à cultura e que afetam diretamente sua produtividade (RUDORFF; BATISTA, 1990).

Todavia, o que se observa é que na utilização dos modelos agrometeorológico-espectrais aplicados não se conhece, por exemplo, o erro associado a certas variáveis climáticas de entrada do modelo. Somado a isso, deve-se levar em consideração o efeito da bienalidade da cultura na produtividade dos cafezais. Uma vez parametrizado o modelo, este pode ser utilizado para estimar a produtividade média das lavouras de café numa dada região. Além disso, os resultados obtidos podem ser utilizados como prognóstico de gerenciamento, auxiliando na tomada de decisão (FAIVRE et al., 2004). Nesse contexto, a pesquisa baseia-se na hipótese de que a adequação do modelo para monitoramento e estimativa de produtividade da cultura cafeeira é influenciada tanto

pelos dados agrometeorológicos e pelas variáveis de sensoriamento remoto, quanto pela escala de simulação e dados de rendimento real disponíveis.

2. OBJETIVOS GERAIS

Analisar as variáveis meteorológicas (precipitação, radiação e temperatura) e a incorporação do índice de vegetação (NDVI/MODIS) no aprimoramento e avaliação da modelagem agrometeorológica-espectral na estimativa de produtividade cafeeira em diferentes escalas.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

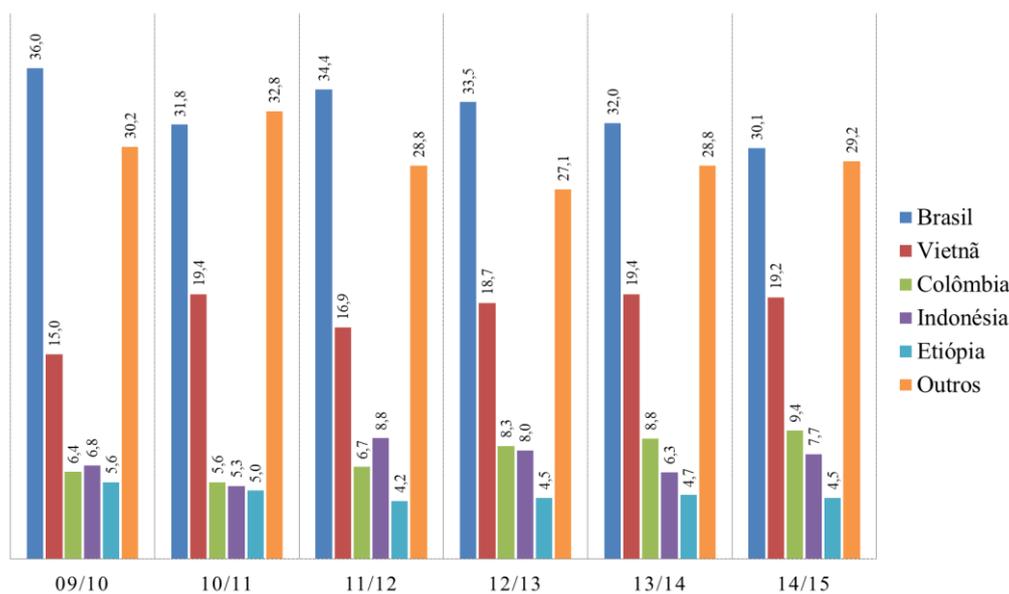
- Avaliar os erros associados às variáveis meteorológicas de precipitação (ETA, CHIRPS e TRMM), radiação de onda curta incidente (ETA) e temperaturas máximas, mínimas e médias (ETA) em relação aos dados medidos em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Monitoramento e análise do comportamento do índice de vegetação em relação aos estádios fenológicos da cultura;
- Avaliar os resultados da incorporação dos dados de índice de vegetação em modelos de estimativa de índice de área foliar e sua influência na modelagem agrometeorológica-espectral para as estimativas de produtividade cafeeira;
- Ajustar os coeficientes de parametrização dos modelos agrometeorológicos-espectrais em nível de fazenda com dados MODIS e dados de campo;
- Analisar a sensibilidade do modelo agrometeorológico-espectral quanto às variáveis radiação de onda curta incidente e de temperatura (máxima e mínima).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações sobre a cafeicultura

De acordo com a Organização Internacional do café (2018), as espécies *Coffea arabica* (Café Arábica) e *Coffea canephora* (Café Robusta ou Conilon) têm importância econômica significativa no mercado mundial, enquanto a espécie Arábica compreendendo cerca de 60,5% da produção mundial do grão, o café Robusta representa 39,5%. Segundo a ABIC (2016), em escala global, o Brasil, o Vietnã e a Colômbia são os maiores produtores de café, com cerca de 58% da produção mundial (**Figura 3.1**).

Figura 3.1 Principais países produtores de café – em porcentagem (%) de produção mundial.

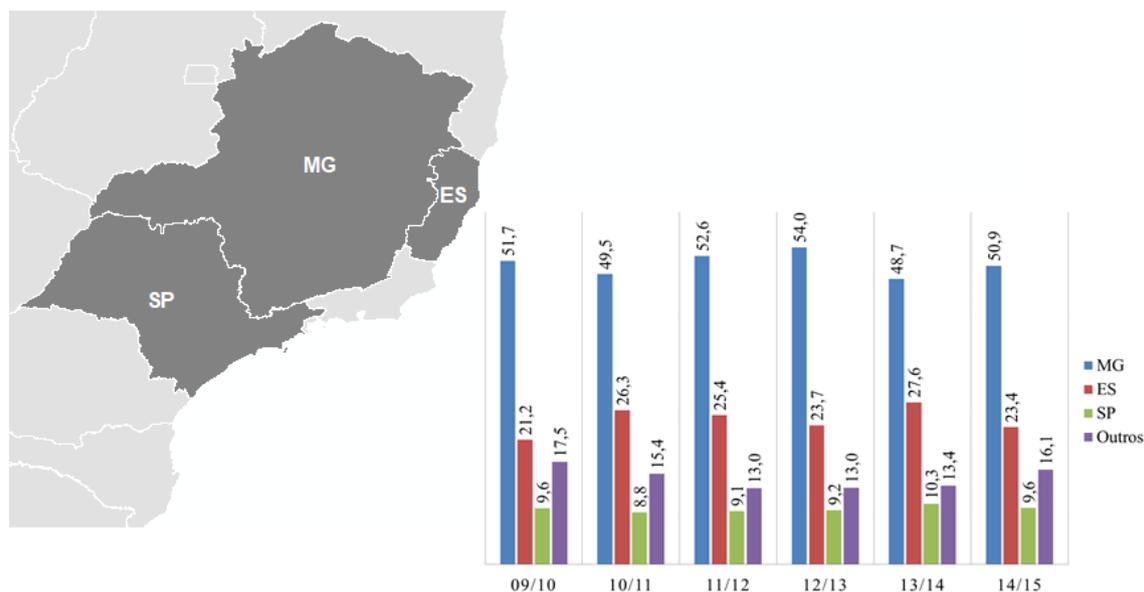


Fonte: ABIC (2016).

No Brasil, de acordo com o IBGE (2016), o café é cultivado em todas as regiões brasileiras, mas está concentrado na Região Sudeste (87% da produção nacional). Dentre os estados produtores destacam-se: Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo com 51%, 26% e 10% da produção nacional, respectivamente (**Figura 3.2**). O Estado de Minas Gerais é o maior produtor brasileiro de café da espécie *Coffea arabica*, enquanto o Espírito Santo, segundo maior produtor brasileiro do grão, é o maior produtor do

Coffea canephora, sendo responsável por 75% da produção nacional de café robusta. Já o Estado de São Paulo, terceiro produtor, cultiva principalmente café arábica (IBGE, 2016).

Figura 3.2 Principais Estados produtores de café – em porcentagem (%) de produção nacional.

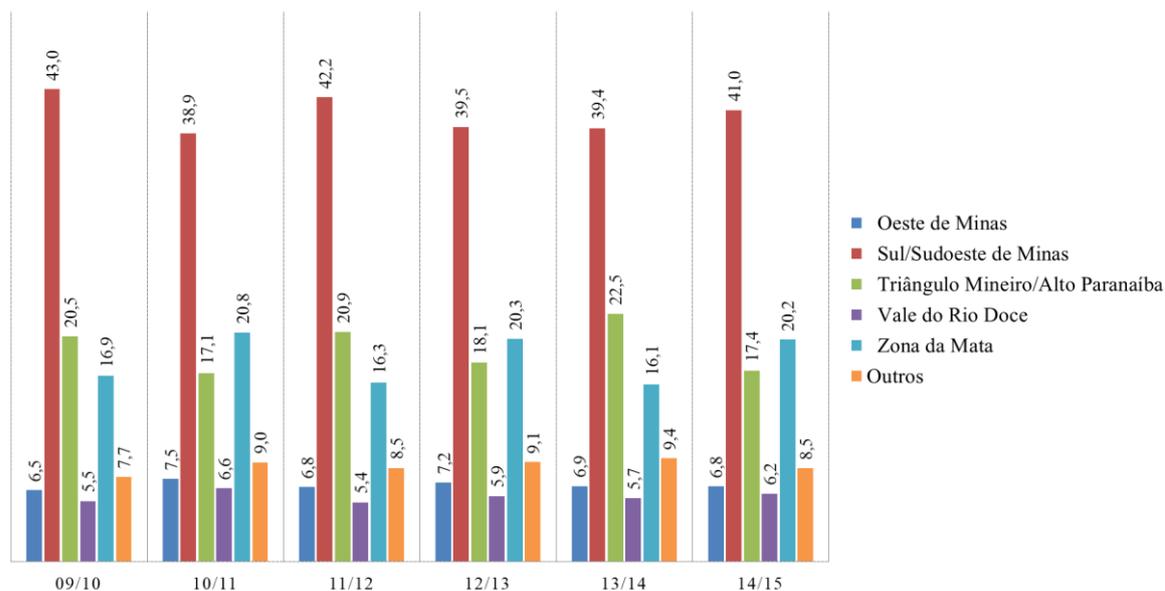


Fonte: IBGE (2016).

Em Minas Gerais, embora o cultivo do café esteja presente em quase todas as mesorregiões do Estado, 80% das lavouras se concentram nas mesorregiões de Sul/Sudoeste de Minas ($\approx 40\%$), Zona da Mata ($\approx 18\%$) e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba ($\approx 19\%$) (**Figura 3.3**).

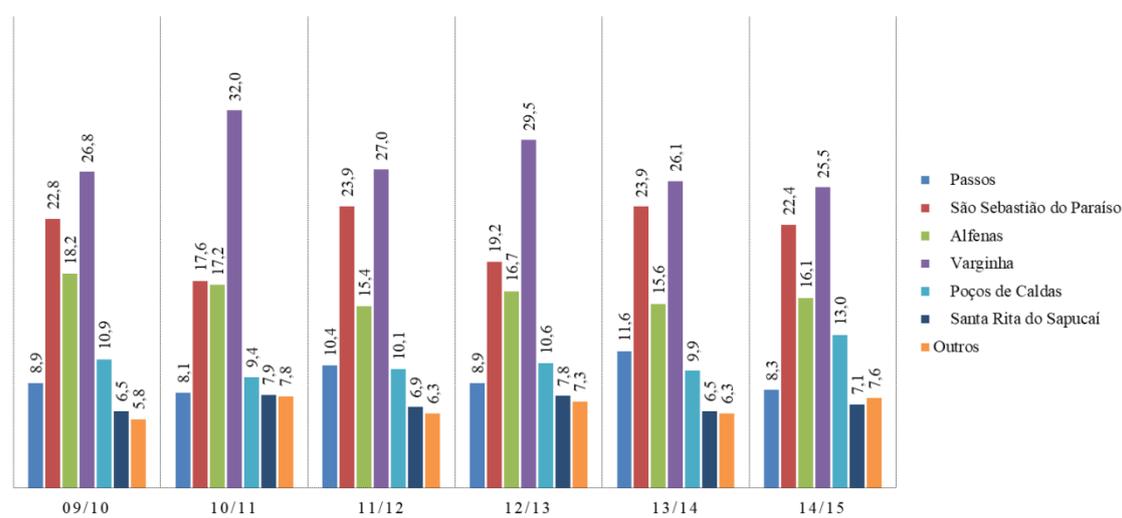
A partir da **Figura 3.4** pôde-se verificar que na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas, principal produtora de café de Minas Gerais, aproximadamente 65% da produção concentra-se nas microrregiões de Varginha ($\approx 28\%$), São Sebastião do Paraíso ($\approx 21\%$) e Alfenas ($\approx 17\%$).

Figura 3.3 Porcentagem da produção de café em Minas Gerais por mesorregiões produtoras - safras 2008/2009 a 2014/2015.



Fonte: IBGE (2017).

Figura 3.4 Contribuição percentual das microrregiões na produção de café na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas - safras 2008/2009 a 2014/2015.



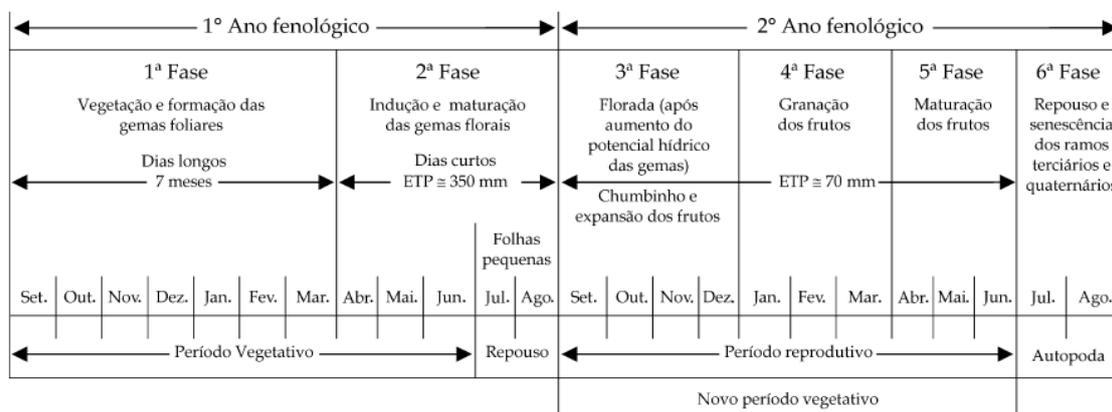
Fonte: IBGE (2017).

3.2 Fenologia do cafeeiro

Camargo e Camargo (2001) subdividem o ciclo fenológico de dois anos do cafeeiro em seis fases distintas: **Primeiro ano:** 1ª fase - vegetação e formação das gemas foliares e 2ª fase - indução e maturação das gemas florais; **Segundo ano:** 3ª fase - florada; 4ª fase - granação dos frutos; 5ª fase - maturação dos frutos e 6ª fase - repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários.

As duas primeiras fases correspondem ao período vegetativo, enquanto as três fases seguintes correspondem ao período reprodutivo do cafeeiro. Na **Figura 3.5** mostrou-se a sequência e as características das seis fases fenológicas do cafeeiro.

Figura 3.5 Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro Arábica.



Fonte: Camargo e Camargo (2001).

Segundo os autores, a esquematização do ciclo fenológico da cultura permite a identificação das fases mais exigente em água e aquelas que necessitam da ocorrência de pequeno estresse hídrico, além das épocas de aplicação de tratamentos fitossanitários e execução das operações agrícolas.

A **fase inicial** (1ª fase) ocorre durante os meses de dias longos (setembro a março), quando se formam os ramos vegetativos, com gemas auxiliares. Em janeiro as gemas vegetativas auxiliares são induzidas por fotoperiodismo em gemas reprodutivas (foliares) (GOUVEIA, 1984; CAMARGO; CAMARGO, 2001). Na **segunda fase** (abril a agosto) ocorre a indução das gemas foliares para gemas florais. Posteriormente, as gemas florais amadurecem, entram em dormência (julho – agosto) e se tornam aptas

para a antese, quando ocorre um aumento do potencial hídrico nas gemas dormentes. Entre os meses de julho e agosto, período anterior à antese (florescência), a deficiência hídrica pode se tornar benéfica, favorecendo uma florada mais uniforme já nas primeiras chuvas de setembro. As gemas florais estão prontas para a antese principal quando o somatório da evapotranspiração potencial (ETP), a partir de abril, atinge cerca de 350 mm (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

A **terceira fase** (setembro a dezembro) inicia-se com a floração, após um choque hídrico (causado por chuva ou irrigação) nas gemas florais maduras. Nessa etapa, temperatura ambiente elevada associada a um intenso déficit hídrico durante o início da florada, provoca a morte dos tubos polínicos pela desidratação e, conseqüentemente, o abortamento das flores, o que resulta nas conhecidas “estrelinhas”, ou seja, com pouco desenvolvimento da parte reprodutiva, as estrelinhas não se transformam em frutos viáveis. Para Sedyama et al. (2001) e Santos e Camargo (2006), as “estrelinhas” se formam devido temperaturas iguais ou superiores a 34°C ou temperaturas médias acima de 23°C na época de florescimento, além disso podem favorecer o abortamento floral, o que diminui consideravelmente a produtividade. Em temperaturas inferiores a 18°C, ocorre exuberância vegetativa e baixa diferenciação floral que torna o desenvolvimento dos frutos mais lento e, conseqüentemente, provoca diminuição da produtividade (CAMARGO et al., 2007).

A fase da florada é seguida pela formação dos chumbinhos, que precede a expansão dos grãos até atingir o tamanho normal. Déficit hídrico intenso nessa fase poderá prejudicar o crescimento dos frutos. A **quarta fase** (janeiro a março) corresponde à granação dos frutos, quando os líquidos internos se solidificam, dando formação aos grãos. Nesta fase, as estiagens severas podem causar o chochamento¹ de frutos (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Segundo Fazuoli et al. (2007), as temperaturas médias superiores a 23°C provocam frutos com desenvolvimento e maturação precoce, ocasionando em perda da qualidade do produto.

¹ O chochamento em frutos de cafeeiros é definido como uma anormalidade verificada na formação da semente ou grão destes frutos (PROCAFÉ, 2014).

Na **quinta fase** (abril a junho) ocorre a maturação dos frutos, etapa na qual a evapotranspiração potencial decresce e deficiências hídricas moderadas beneficiam a qualidade do produto. Na **sexta fase** (julho e agosto), ocorre a senescência dos ramos produtivos não-primários, que secam e morrem (auto-poda dos cafeeiros). Na primavera do ano civil seguinte brotam novos ramos vegetativos, que se transformam em reprodutivos, permitindo nova produção, defasada no ano seguinte (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

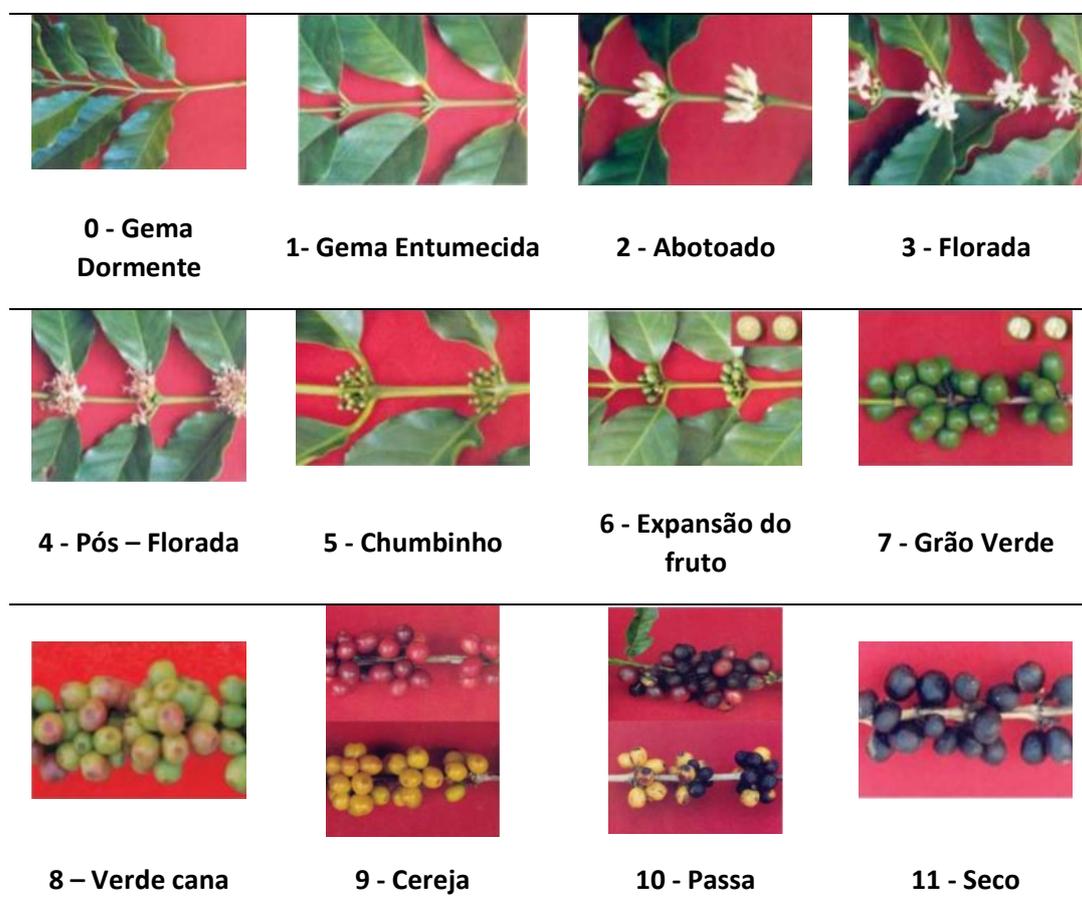
Pezzopane et al. (2003) criaram uma escala de desenvolvimento fenológico da fase reprodutiva do cafeeiro (**Figura 3.6**). De acordo com os autores, após o período de repouso das gemas nos nós dos ramos plagiotrópicos (0) ocorre aumento do potencial hídrico nas gemas florais maduras, devido à ocorrência de um “choque” hídrico. Nesse estágio, as gemas entumecem (1) e os botões florais crescem devido à grande mobilização de água e nutrientes (2), posteriormente, há abertura das flores (3) e, em seguida, queda das pétalas (4). Após a fecundação, inicia-se a fase de chumbinho (formação dos frutos) (5).

Ainda segundo os mesmos autores, após a fase de chumbinho, os frutos se expandem (6) rapidamente. Ao atingirem seu crescimento máximo, ocorre a formação do endosperma, que segue a fase de grão verde (7), com a granação dos frutos. A partir da fase “verde cana” (8), que caracteriza o início da maturação, os frutos começam a mudar de cor (verde para amarelo), evoluindo até o estágio “cereja” (9), e já se pode diferenciar a cultivar de fruto amarelo ou vermelho. Finalmente, os frutos começam a secar (10) até atingirem o estágio “seco” (11).

Na cafeicultura brasileira, um fator fisiológico significativo do cafeeiro que provoca variação de sua produção é a alternância bienal. De acordo com Matiello (2010) o ciclo bienal de produção cafeeira refere-se à característica de safras altas (bienalidade positiva) alternadas com baixas safras (bienalidade negativa). O autor salienta que quando a lavoura produz muito num ano, suas reservas são carreadas para a frutificação, prejudicando o crescimento dos ramos e reduzindo a produção da safra seguinte. De acordo com Japiassú et al. (2009) e a Matiello (2010), tem-se promovido um ciclo de

alta produção seguido por ciclo de “Safr Zero”, no qual é feita a poda, geralmente por esqueletamento dos ramos produtivos logo após a safra elevada, as novas brotações que se seguem só produzirão frutos após dois anos.

Figura 3.6 Escala para determinação de estádios fenológicos do café arábica.



Fonte: Pezzopane et al. (2003).

As fases fenológicas, produtividade e qualidade da bebida do cafeeiro da espécie arábica são afetadas pela variação fotoperiódica, pela distribuição pluviométrica e a temperatura do ar (CAMARGO et al, 2007; MEIRELES et al., 2009). De acordo com Picini et al. (1999) e Assad et al. (2004), o café arábico é afetado principalmente pela disponibilidade hídrica e em segundo plano estão os efeitos da temperatura.

3.3 Modelagem da estimativa de produtividade de culturas

Um modelo é uma representação esquemática ou conjunto de equações matemáticas que representam um sistema e representará apenas o conhecimento disponível sobre o mesmo. O modelo é utilizado para fornecer uma explicação para certos fenômenos e postular processos subjacentes que provocam as observações sob inspeção (BAIER, 1979; FORD, 2009; RAUFF; BELLO, 2015).

De acordo com Acock e Acock (1991) os modelos podem ser classificados em: (i) conceitual, (ii) físico e (iii) matemático. O **modelo conceitual** é uma consolidação clara, objetiva, concisa e precisa de todos os aspectos estruturais e comportamentais relevantes ao objetivo de estudo, apresentados em um formato predefinido, fornecendo a base para o modelo matemático (ROBINSON et al., 2015). Podendo ser utilizado com um completo do modelo matemático, o **modelo físico** é, em escala aumentada ou reduzida, uma representação simplificada de um fenômeno a ser investigado (DOURADO-NETO et al.; 1998). O **modelo matemático** é a representação do sistema por meio de conjunto de equações matemáticas que representam o comportamento de um sistema (MURTHY, 2003).

Segundo Acock e Acock (1991), os modelos matemáticos podem ser divididos em modelos empíricos e modelos mecanicistas. Baier (1979), por sua vez, divide os modelos em empíricos, modelos mecanicista de análise entre a relação planta-clima e de simulação de crescimento. Os modelos (i) **estatísticos empíricos** descrevem as relações entre as variáveis, sem se referir aos processos correlacionados (ACOCK; ACOCK, 1991); (ii) **mecanicistas** tentam representar relações de causa e efeito entre as variáveis (JENSEN, 1968; DOORENBOS; KASSAM, 1979; ACOCK; ACOCK, 1991).

Os modelos **simulação de crescimento** envolvem a descrição matemática dos processos físicos, químicos e/ou fisiológicos relacionados com o desenvolvimento, crescimento e produtividade da planta (ACOCK; ACOCK, 1991). Os modelos de simulação de culturas simulam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade em função da dinâmica planta-solo-atmosfera. As variáveis do modelo, tal como a fase de desenvolvimento, a massa seca ou o índice de área foliar, estão ligados às variáveis de

entrada, assim como as variáveis climáticas, geográficas e de manejo (DELÉCOLLE et al., 1992).

Fazem parte do modelo de simulação de crescimento os módulos solo, planta e atmosfera. O módulo solo representa a transferência de água dentro do solo derivada a partir da entrada de água por precipitação ou irrigação, e incorpora os processos de infiltração, drenagem, redistribuição de água no perfil e a transferência de nutrientes (LEENHARDT et al., 1995). O módulo planta descreve os mecanismos de produção de biomassa, com base na interceptação e na transformação da radiação fotossinteticamente ativa e o desenvolvimento da cultura, que simula as principais fases do cultivo (germinação, floração, produção de sementes e senescência). O módulo atmosfera representa a evapotranspiração e permite interações entre os módulos planta e solo: quando o abastecimento de água no solo torna-se limitante, os principais processos fisiológicos, tais como a fotossíntese e expansão das folhas são reduzidos (FAIVRE et al., 2004).

Os modelos mecanicistas, que incluem a modelagem agrometeorológica, têm estrutura intermediária entre os tipos empíricos e de simulação de crescimento, apresentam menos restrições do que os empíricos e são mais simples e requerem menor quantidade de informações do que os de simulação do crescimento (DELÉCOLLE et al., 1992). Conforme Dourado Neto et al. (1998), os modelos empíricos não podem ser extrapolados e são limitados a ambientes semelhantes àquelas em que foram gerados, diferentemente dos modelos mecanicistas que representam os processos no sistema e podem ser utilizados sob condições diversas. Os modelos de simulação de crescimento têm aplicação mais restrita, pois requer grande número de informações dos processos físicos e biológicos (ACOCK; ACOCK, 1991).

O modelo agrometeorológico, portanto, expressa a relação entre as variáveis climáticas e características próprias da cultura tal como desenvolvimento ou produtividade agrícola através de representação esquemática ou um conjunto de equações (DOURADO NETO et al., 1998; MURTHY, 2003; ARAÚJO et al., 2011). A modelagem espectral pretende relacionar características do cultivo com a variável espectral fornecida pelo

sensoriamento remoto (YOUNAN; KING, 1999; GALVÃO et al., 2009; FOSCHIERA, 2015). A modelagem agrometeorológica-espectral consiste na agregação das informações contidas nos dados espectrais (bandas e/ou índices de vegetação) provenientes de imagens de satélites aos modelos agrometeorológicos cujas estimativas de produtividade são baseadas nas variáveis meteorológicas (RUDORFF, 1985; RUDORFF; BATISTA, 1990; SUGAWARA, 2002; RIZZI, 2004; PICOLI, 2006; SUGAWARA, 2010; NOGUEIRA, 2014).

Em relação à cafeicultura, a utilização de modelos que monitoram os efeitos do clima durante os estádios fenológicos críticos da cultura é importante para a estimativa de produtividade. É válido ressaltar que a determinação das relações entre os parâmetros climáticos e a produtividade agrícola é uma tarefa difícil, pois para diferentes fases fenológicas da cultura, os fatores ambientais afetam de diferentes maneiras o crescimento e o desenvolvimento das plantas (CAMARGO; CAMARGO, 2001; CAMARGO, 2010).

Tosello e Arruda (1962) correlacionaram as estimativas de produção de café e a precipitação pluvial para o Estado de São Paulo. De acordo com os autores, as precipitações ocorridas entre os intervalos de abril-setembro e julho-setembro foram as mais significativas para as produções. O mesmo resultado foi observado na correlação entre a produção e o déficit hídrico.

Liu e Liu (1986) observaram que a estimativa de produtividade cafeeira é complexa, uma vez que há características específicas à cultura, como bienalidade, não sendo a produtividade explicada apenas pelas variáveis climáticas. Segundo Weill et al. (1999), são fatores importantes à produção os atributos climáticos, a produção do ano anterior e a população de plantas.

Picini et al. (1999) relacionou fatores climáticos, fenologia, bienalidade (expressa pela inclusão da produtividade do ano anterior ao modelo) e a produtividade cafeeira. Os autores testaram os modelos multiplicativo (JENSEN, 1968) e aditivo (DOORENBOS;

KASSAM, 1979) sobre a cultura cafeeira incorporando à ambos a produtividade do ano anterior da seguinte forma:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[k_{y_o} \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) + \sum_{i=1}^n k_{y_i} \left(1 - \frac{ET_r}{ET_p} \right) \right] \quad (3.3)$$

e

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \left[1 - k_{y_o} \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right] * \prod_{i=1}^n \left[1 - k_{y_i} \left(1 - \frac{ET_r}{ET_p} \right) \right] \quad (3.4)$$

em que: Y_r = produtividade real, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; Y_p = produtividade potencial, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; Y_r/Y_p = produtividade relativa; Y_{aa} = produtividade do ano anterior, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; ET_r = evapotranspiração real, [mm.dia⁻¹]; ET_p = evapotranspiração potencial, [mm.dia⁻¹]; k_{y_o} = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior; k_{y_i} = fator de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos do cafeeiro.

O estudo de Picini et al. (1999) foi realizado para os estádios fenológicos de dormência, de florescimento e de formação de grãos em diferentes combinações de duração. A produtividade máxima foi mantida constante e os coeficientes k_{y_o} e k_{y_i} foram utilizados na parametrização do modelo. De acordo com os autores, o modelo com penalização aditiva apresentou melhor desempenho na parametrização dos coeficientes em relação ao multiplicativo. Os melhores ajustes entre dados observados e estimados foram obtidos com modelo aditivo (R^2 entre 0,84 e 0,91), no qual os coeficientes de resposta da cultura ao suprimento hídrico revelaram que a produtividade do cafeeiro foi particularmente sensível ao estresse hídrico durante os estádios fenológicos de florescimento e de formação do grão. Os autores relatam que o melhor ajuste da modelagem agrometeorológica foi observado nos períodos junho a fevereiro, para os estádios de dormência das gemas florais ao início da maturação. Ainda segundo os autores, a produtividade do ano anterior deve ser considerada em modelos agrometeorológicos aplicados para o cafeeiro, pois minimizam a interferência da bienalidade do ciclo da cultura sobre os modelos.

Camargo et. al. (2003) propuseram um modelo agrometeorológico para estimativa da quebra de produtividade do café. O modelo desenvolvido pelos autores considera o fator fenológico e índices de sensibilidade aos estresses hídrico (deficiência) e térmico (geada e altas temperaturas) em forma de penalização multiplicativa durante as fases fenológicas críticas do cafeeiro. O modelo matemático de monitoramento e de estimativa da quebra de produtividade do café foi expresso por:

$$Q = [f_{DH} * f.T_{min} * f.T_{máx}] \quad (3.5)$$

em que: Q = estimativa da quebra relativa de produtividade esperada de café, [%]; f_{DH} = fator de penalização por deficiência hídrica; $f.T_{máx}$ = penalização por temperaturas máxima decendiais durante os estádios do florescimento e chumbinho, [%]; $f.T_{min}$ = fator de penalização por temperatura mínima propícia a ocorrência de geada.

O componente fenológico não está inserido na equação acima, pois é utilizado para estimar o início dos estádios do florescimento pleno da maturação de grãos do cafeeiro. Esse componente visa estimar as épocas de início da “plena floração”, baseado na quantidade de calor acumulado necessário para que as gemas florais completem a maturação, ficando prontas para a antese plena quando o somatório de graus-dia (GD) a partir de abril atinge 1.590 GD (CAMARGO et al., 2003; CAMARGO et al., 2007).

Zacharias et al. (2007) parametrizaram a componente fenológica de estimativa do início da fase da floração plena do cafeeiro do modelo desenvolvido por Camargo et al. (2003). Os autores consideraram os valores ET_p acumulados de 335 mm ou de GD equivalente a 1.579, para as gemas florais atingirem a maturação, e um mínimo de 7 mm de chuva para quebra da dormência das gemas maduras. De acordo com o estudo, esses valores apresentaram melhor capacidade de indicar a época da plena floração do cafeeiro Arábica, com erros de estimativa inferiores ao do modelo original.

O componente térmico do modelo de Camargo et al. (2003) baseia-se na ocorrência de temperaturas absolutas máximas ($> 34^{\circ}\text{C}$) ocorridas na época da florada e temperaturas

absolutas mínimas, representativas de geadas ($< 2^{\circ}\text{C}$), ocorridas durante as fases fenológicas críticas e que interferem na produtividade da cultura. O fator de penalização por geada é considerado durante os meses de maio a setembro e o fator temperatura máxima é considerado durante o período que compreende 30 dias após o pleno florescimento (CAMARGO et al., 2007).

Santos e Camargo (2006) modificaram e parametrizaram o modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do café proposto por Camargo et al. (2003), o modelo foi modificado visando considerar também os efeitos da produtividade do ano anterior. O modelo é expresso por:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \left\{ \left[1 - \left(k_{yo} * \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right) \right] * f_{T_{min}} * f_{T_{max}} * f_{DH} \right\} \quad (3.6)$$

em que: Y_r = produtividade real, $[\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}]$; Y_p = produtividade potencial, $[\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}]$; k_y = fator de resposta à produtividade e varia de acordo com o estágio fenológico da cultura; Y_{aa} = é a produtividade do ano anterior, $[\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}]$; k_{yo} = corresponde ao coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior; $f.T_{máx}$ = penalização por temperaturas medias decendiais durante os estádios do florescimento e chumbinho, [%]; $f.min$ = fator de penalização por temperatura mínima propícia a ocorrência de geada; f_{DH} = fator de penalização por deficiência hídrica.

O modelo de Santos e Camargo (2006) foi desenvolvido sobre talhões de área cafeeira de fazendas do Estado de São Paulo. A parametrização dos coeficientes de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (k_y) indicou os maiores valores durante as fases fenológicas da indução floral, do florescimento e da granação. O teste do modelo parametrizado indicou valores de coeficientes de correlação de Pearson (R) entre 0,76 e 0,93, enquanto os valores de erros sistemáticos foram relativamente baixos, entretanto apresentaram pequena tendência a superestimar a produtividade. No modelo de Santos e Camargo (2006) as melhores estimativas são encontradas quando se consideram os efeitos da produtividade do ano anterior e de temperaturas adversas sobre a produtividade do cafeeiro. Os autores concluíram que o modelo modificado e parametrizado tem

potencial para estimar a produtividade do café, podendo servir como subsídio aos trabalhos de previsão de safra.

Alfonsi (2008) realizou um estudo para estimar a produtividade cafeeira através da utilização de índices fenológicos de produtividade baseado na contagem de frutos, internódios produtivos, altura de planta e espaçamento da lavoura para o nível hierárquico talhão e propriedade rural. De acordo com o autor, a modelagem permitiu a estimativa da produtividade com até seis meses de antecedência da colheita. Miranda (2015) utilizou metodologia similar àquela empregada por Alfonsi (2008) e observou que uma vez que as variáveis climáticas influenciam o desenvolvimento da cultura, consequentemente há influência do fator climatológico na correlação entre os índices fenológicos e a produtividade observada em campo.

A modelagem de produtividade exige grande número de informações específicas da cultura, das características do solo, das práticas de manejo e das condições climáticas que geralmente não estão disponíveis. Nesse sentido, o sensoriamento remoto por satélite fornece informações a custo razoável e menor intervalo de tempo podendo fornecer de forma rápida informações sobre mudanças relacionadas ao ambiente no qual a cultura está inserida (GUERIF; DUKE, 2000; YANG et al., 2004; BAEZ-GONZALEZ et al., 2005).

A integração de dados de sensoriamento remoto com um modelo de culturas pode ser obtida através da incorporação do índice de área foliar (IAF) obtido da correlação com índice de vegetação do sensoriamento remoto. Nesse sentido, no estudo da estimativa de produtividade da cultura cafeeira no Brasil, pode-se citar os trabalhos de Rosa (2007), Bernardes (2013) e Almeida (2013). Os autores Rosa (2007) e Bernardes (2013) propuseram a utilização do modelo agrometeorológico-espectral para a cultura do café na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas. Segundo Rosa (2007), o modelo agrometeorológico-espectral tem grande potencial na estimativa de produtividade a nível regional, no entanto o autor comenta que a diminuição da área de abrangência, ao nível microrregional, e ao nível municipal, acarretou aumento do erro associado à modelagem.

De acordo com Bernardes (2013), a incorporação da informação espectral ao modelo agrometeorológico apresenta melhores resultados de estimativa da produtividade cafeeira do que a estimativa feita apenas com modelos espectrais. Segundo o mesmo autor, a estimativa de produtividade ao nível de lavoura apresenta altos erros, entretanto, há melhora da modelagem quando o modelo é aplicado a nível de município. Em estudo realizado em fazendas cafeeiras, Almeida (2013) observou que a incorporação do índice NDVI apresentou boa relação com os períodos fenológicos e sistemas de manejo da cultura. Além disso, a produtividade modelada e a produtividade de campo apresentaram coeficiente de regressão (R^2) entre 0,79 e 0,95, indicando potencial da aplicação do modelo.

Segundo Hansen e Jones (2000), a validade dos modelos depende da qualidade da representação da variabilidade espacial dos dados de entrada. Assim, a aplicação do modelo em grandes áreas requer a incorporação da heterogeneidade ambiental (dados de manejo, épocas de plantio e colheita, dados meteorológicos, IAF, mapas de solos e de distribuição da cultura) à modelagem (FAIVRE et al., 2004).

3.3.1 Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas afetam desde o preparo do solo, a colheita e o transporte, até o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas (MONTEIRO, 2009). Nesse contexto, a informação das condições meteorológicas fornecida por estações terrenas é de suma importância para o planejamento das atividades agrícolas, para o monitoramento de lavouras e na tomada de decisão. Entretanto, o Brasil apresenta baixa densidade e distribuição irregular de estações meteorológicas, os dados geralmente são de difícil acesso e podem apresentar irregularidades, o que limita seu registro e caracterização dos padrões espaciais e temporais das variáveis ambientais necessários ao planejamento agrícola, à pesquisa e, conseqüentemente, a aplicação dos dados na modelagem de produtividade agrícola (ADAMI et al., 2006; HUGHES, 2006; CAMPAROTTO et al., 2013).

Em grandes escalas territoriais, dados de sensoriamento remoto e previsões numéricas tornaram-se uma fonte alternativa para suprir a falta de dados de estações

meteorológicas, pois fornecem séries temporais de dados, em escala global e/ou regional, que permitem detectar eventos e a tomar decisões, entretanto ainda são pouco utilizados no setor agrícola (VIEIRA et al., 2009; BORGA et al., 2014).

Atualmente são inúmeros os produtos provenientes de modelos numéricos, são exemplo ETA (MESINGER et al., 2012) e GFS (NOAA, 2017), e dados baseados em sensoriamento remoto e informações de observações de estações meteorológicas, tais como TRMM (KHANDU et al., 2016), GPCP (HUGHES, 2006; SCHNEIDER et al., 2015), PERSIANN (SOROOSHIAN et al., 2000) e CHIRPS (FUNK et al., 2014; KATSANOS et al., 2016).

Porém, esses dados estão sujeitos a erros que devem ser avaliados e validados para serem utilizados, por exemplo, na determinação do balanço hídrico (SHEP-FIELD et al., 2009; GAO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2014), imprescindível na estimativa da deficiência e/ou excedentes hídricos durante o ciclo da cultura de interesse, no estudo da aptidão agrícola, para detecção de mudança que auxiliam na aplicação de práticas de manejo e até mesmo em modelos de produtividade de cultura agrícolas baseados na evapotranspiração real e estresse hídrico (GODOY, ASSAD, 2002; BRUNO et al., 2007; SOUZA; GOMES, 2008; DOURADO-NETO et al., 2010; ROSA et al., 2010).

Sugawara (2010) avaliou a relação entre dados meteorológicos modelados pelo ETA e estimados em estações meteorológicas do CIIAGRO para o Estado de São Paulo. Segundo o autor, as estimativas do modelo regional ETA para as temperaturas mínimas foram superestimadas e para as temperaturas máximas foram subestimadas em relação aos dados das estações do CIIAGRO. O autor ressaltou que as estimativas das temperaturas mínima e máxima realizadas pelo modelo regional ETA podem ser utilizadas no modelo agrônomico de Doorenbos e Kassam (1979), pois os erros observados na comparação com os dados provenientes de estação meteorológica não devem interferir nos resultados obtidos com o uso deste modelo.

Vieira et al. (2009) avaliaram as previsões meteorológicas de precipitação e temperatura (máxima e mínima) do modelo ETA para o Centro-Sul do Brasil. Na análise observou-

se que as precipitações pluviiais médias foram subestimadas em relação aos dados de campo, exceto para a região de Minas Gerais onde houve superestimativa dos valores de precipitação fornecidos pelo ETA. Em relação aos dados de temperatura, houve subestimativa das máximas e superestimativa das mínimas. De acordo com os autores, uma forma adequada de aplicação das séries temporais de temperatura do ar em modelos de produtividade é por meio da remoção do erro sistemático.

A validação de todos os componentes da modelagem é uma tarefa difícil em virtude da falta de dados ambientais e referentes à cultura, o que leva à validação somente da variável de interesse final. Entretanto, deve-se avaliar a representatividade e qualidade dos dados de entrada. Valores de precipitação e evapotranspiração real são fatores determinantes aos fins agrônômicos e requerem análise de qualidade e validação para seu emprego (BOOTE et al., 1996; BALTOKOSKI et al., 2010; OTENG-DARKO et al., 2013).

3.3.2 Características dos dados de sensoriamento remoto

As informações fenológicas oferecem suporte para avaliar a produtividade e o manejo das culturas agrícolas (SAKAMOTO et al., 2005). No sensoriamento remoto os índices de vegetação (IVs) são sensíveis às mudanças fenológicas e têm sido correlacionados à produtividade agrícola (BOLTON; FRIEDL, 2013; KOGAN et al., 2013; FU et al., 2014), utilizados para estimar atributos como IAF que podem ser relacionados à produtividade agrícola (TAUGOURDEAU et al., 2014; JIANG et al., 2014; LI et al., 2017; LIAQAT et al., 2017) ou incorporados à modelagem (PADILLA et al., 2012; BERNARDES, 2013; KOWALIK et al., 2014). A incorporação de dados de sensoriamento remoto à modelagem melhora a estimativa da produtividade agrícola, pois por meio do dado pode-se obter uma avaliação multiespectral do estado das culturas dentro de uma determinada área, favorecendo o estudo das relações da planta com o ambiente (DELÉCOLLE et al., 1992; YANG et al., 2004).

A reflectância de uma cultura agrícola está relacionada às formas como ocorrem as interações entre a radiação eletromagnética e as características próprias da vegetação tais como estrutura vegetal, estágio fenológico, densidade da vegetação, orientação

espacial e efeitos do solo de fundo (GALVÃO et al., 2005; SHIMABUKURO; PONZONI, 2012). Em áreas de culturas perenes, tal como o café, fatores como o solo, a sistemática de uso de implementos agrícolas, o sombreamento interno e entre fileiras e a sazonalidade da cultura aumentam a complexidade do estudo das características espectrais dos cafeeiros (EIPHANIO et al., 1994). Ressalta-se ainda, as características de bienalidade do cafeeiro e os sistemas variados de poda que introduzem mudanças ao comportamento espectral do talhão (EIPHANIO et al., 2010).

A variação nas geometrias de iluminação e visada, bem como característica não-lambertiana da superfície e topografia, também influenciam a resposta espectral do alvo (MATTAR et al., 2014; MOREIRA; VALERIANO, 2014). Segundo EDIRIWEERA et al. (2013), a topografia influencia a radiância medida pelos sensores e reduz a precisão das estimativas derivadas da cobertura vegetal. De acordo com o mesmo autor, a correção topográfica sobre os valores de reflectância poderia melhorar a previsão de parâmetros biofísicos da vegetação.

Além das características de cultivo descritas acima, pode-se citar outras duas características que condicionam a capacidade de utilização de dados de sensoriamento remoto: resolução espacial e frequência de observação. Estas características determinam o menor objeto perceptível (resolução espacial) para o sistema de observação e a capacidade de detectar alterações no objeto ao longo do tempo (resolução temporal) (DELÉCOLLE et al., 1992).

Com relação à resolução temporal, sabe-se que as análises de séries temporais fornecem informações cruciais para compreensão da variabilidade de um sistema (GHIL et al., 2002). Os dados medidos pelos sensores devem estar estreitamente relacionados com o estado da superfície terrestre observada, entretanto, os conjuntos de dados de séries temporais podem apresentar falhas pela presença de nuvens, poeira, más condições atmosféricas e efeitos direcionais de tomada dos dados, o que torna a continuidade temporal, consistência e confiabilidade das séries temporais abaixo do ideal para, por exemplo, o acompanhamento do ciclo da cultura ao longo do seu desenvolvimento (ATZBERGER; EILERS, 2011; KANDASAMY et al., 2013).

Diversos métodos de preenchimento dessas lacunas de dados têm sido desenvolvidos, dentre os quais, oito métodos foram avaliados por Kandasamy et al. (2013) em séries temporais IAF/MODIS (coleção 5, de resolução temporal de 8 dias e resolução espacial de 1 km): (i) métodos de decomposição que exploram a série temporal como um todo: *Iterative Caterpillar Singular Spectrum Analysis* (ICSSA), *Empirical Mode Decomposition* (EMD), *Low Pass Filtering* (LPF) e *Whittaker Smoother* (Whit) e; (ii) métodos de ajuste de curva de janelas temporais limitadas: *Savitzky–Golay Filter* (SGF), *Temporal Smoothing and Gap Filling* (TSGF) e *Asymmetric Gaussian Function* (AGF) e *Climatological* (Clim). No estudo os métodos foram avaliados quanto a capacidade de operar ao longo de períodos (de comprimento variável) sem observações, a fidelidade de valores reconstruídos em relação à série temporal considerada como referência, a suavização dos perfis temporais reconstruídos e a capacidade de capturar estádios fenológicos. De acordo com os autores há diminuição da precisão dos valores reconstruídos para locais com falta de dados superior a 20%. Nesse caso, TSGF fornece o melhor desempenho em relação aos outros métodos. Em relação à suavização do perfil temporal, há discordância entre todos os métodos, entretanto, o método TSGF apresentou melhor suavização do perfil temporal para lacunas de dados superiores a 30%, enquanto os métodos ICSSA, LPF, Whit, AGF e Clim forneceram perfis mais suavizados para lacunas inferiores a 30%. As datas de início, máxima e final de estação de crescimento são estimadas com precisão em locais com lacunas inferiores a 10% por todos os métodos.

Adami (2010) analisou o comportamento dos métodos 4253H twice; Savitzky–Golay; função duplo-logística; gaussiano assimétrico; Análise Harmônica (HANTS); e Wavelets para remoção de ruído de séries temporais de IV/MODIS (resolução temporal de 8 dias). Os métodos foram avaliados quanto à capacidade de preencher lacunas de observação, para tanto a partir de uma série temporal dita ideal, dados foram simulados com três níveis de ruído, 10%, 40% e 70%. De acordo com os resultados das análises os filtros 4253H twice, Hants e Wavelet-DB6 podem ser utilizados para filtrar uma série temporal com nível de ruídos de até 10%. Os filtros Hants, Savitzky–Golay e duplo-logística tiveram desempenho similar e foram mais indicados para filtrar as séries

temporais com lacunas de 40%. Os filtros Hants, Savitzky–Golay e o duplo-logística apresentaram bom desempenho na suavização de lacunas de 70%.

3.3.3 Estimativa do índice de área foliar a partir de dados de SR

Um fator imprescindível na modelagem é o índice de área foliar (IAF) que segundo Watson (1952), é a relação entre a área foliar e a área do terreno ocupado pela cultura de interesse. Informações sobre o IAF são associadas ao crescimento da cultura, a interceptação de luz e troca gasosa planta/atmosfera e, conseqüentemente, a fotossíntese, a evapotranspiração, a assimilação de biomassa, a produtividade e ao balanço de energia (CABEZAS-GUTIÉRREZ et al., 2009), sendo um importante componente de modelos de crescimento (LIZASO et al., 2003; LUKEBA et al., 2013) e estimativas de produtividade (LIAQAT et al., 2017).

Os valores de IAF podem ser adquiridos em medições de campo (métodos diretos: destrutivos ou não-destrutivos) ou a partir de imagens de satélite (método indireto), por meio de índices de vegetação obtidos da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto (TAUGOURDEAU et al., 2014). As análises de séries temporais de índices de vegetação fornecidos pelo sensoriamento remoto permitem determinar as estações de crescimento, monitorar as condições da cultura ao longo do seu ciclo fenológico, caracterizar as dinâmicas sazonais e interanuais da vegetação, informações estas cruciais para a compreensão da variabilidade da área agrícola (REN et al., 2008).

Os algoritmos desenvolvidos para obter variáveis biofísicas e bioquímicas de dados de sensoriamento remoto podem ser subdivididos em (i) **Estatísticos**: buscam uma relação estatística entre a reflectância e as propriedades medidas do dossel e (ii) **Físicos**: baseiam-se nos princípios da propagação da radiação dentro do dossel (DORIGO et al., 2007).

Segundo Dorigo et al. (2007), uma das principais desvantagens atribuídas a abordagens estatísticas, é que elas são geralmente restritas às condições que prevaleceram durante o experimento, tanto relacionadas aos fatores intrínsecos ao próprio dossel (p. ex. estágio fenológico), como aos fatores externos (propriedades locais do solo, condições

atmosféricas, geometria de iluminação e de visada). Conforme salientam os autores, é crucial avaliar a robustez das relações estabelecidas pela modelagem, testando o desempenho do modelo sobre conjuntos de dados independentes, como outras culturas e campos ou até mesmo no mesmo campo, mas sob diferentes condições de visualização ou diferentes estádios fenológicos.

Nas abordagens físicas é empregada a inversão do modelo de reflectância do dossel, ou seja, consiste em encontrar o conjunto de parâmetros de entrada que leva à melhor correspondência entre o fator de reflectância bidirecional (FRB) simulado com um modelo de reflectância do dossel e a reflectância medida pelo sensor (DORIGO et al., 2007). Os modelos descrevem a transferência radiativa dentro do dossel, considerando o espalhamento e a absorção do dossel sobre a energia incidente (VALERIANO, 2003). De acordo com Duan et al. (2014) a inversão de modelos de transferência radiativa é a técnica mais estabelecida de determinação do IAF a partir de dados de sensoriamento remoto.

Campos (2008) avaliou a inversão do módulo PROSAIL do modelo GRART (*Geometrically Regular Arbitrary Radiative Transfer*) em estandes de cafezais no qual a reflectância medida pelo sensor ASTER foi utilizada para avaliar o desempenho do modelo em simular o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) em um intervalo de parâmetros estruturais (medidos) e espectrais (medidos e simulados no modo PROSAIL). O autor ressalta que tanto a sensibilidade quanto a incerteza dos parâmetros precisam ser examinados antes da definição do método operacional para a estimativa de parâmetros agronômicos.

Duan et al. (2014) avaliaram a inversão do modelo PROSAIL para estimar o índice de área foliar das culturas de milho, batata e girassol utilizando dados de entrada de sensoriamento remoto hiperespectral obtidos de veículo aéreo não tripulado. No estudo foi comparado o desempenho da estimativa do IAF utilizando um e dois ângulos de observação tomadas em campo. De acordo com os autores, o modelo PROSAIL não leva em conta os efeitos de sombreamento das culturas em linha, esses efeitos de sombreamento resultam no aumento da reflectância na direção de retro-espalhamento e

reduz a reflectância na direção do espalhamento frontal. Ainda de acordo com os autores combinações de variáveis biofísicas dos dosséis podem refletir em um espectro de reflectância de dossel similar, além disso, as medidas e as incertezas dos modelos podem resultar em simulações enviesadas dos espectros de reflectância.

Dorigo et al. (2007) salientam que a capacidade intrínseca de modelos de reflectância do dossel para descrever relações de causa-efeito torna possível otimizar a recuperação de uma variável com base na inversão do modelo. Entretanto, de acordo com os mesmos autores, a robustez de recuperação de parâmetro biofísico utilizando modelos de reflectância é regida, principalmente, pela seleção de um modelo apropriado para o dossel sob consideração. Além disso, a precisão de recuperação depende fortemente da escolha de um procedimento de inversão apropriada, uma parametrização precisa e da disponibilidade e utilização de conhecimento prévio.

O IAF é uma variável de difícil quantificação, pois apresenta alta variabilidade espacial e temporal (BRÉDA, 2003). Além disso, na utilização de dados de SR na determinação do IAF, deve-se atentar ao fato de que a propagação da radiação através do dossel é influenciada pelos seus constituintes tais como folhas, hastes, galhos e flores, e também pela posição e ângulos desses elementos (KUCHARIK et al., 1998), enquanto a assimilação da radiação pelo sensor orbital está associada tanto com a cultura (p. ex. fenologia, orientação do plantio, poda e bienalidade), quanto com o ambiente ao qual essa cultura está inserida (p. ex. características topográficas e superfície de fundo) e com características do próprio sensor (p. ex. ângulo de visada) (EPIPHANIO et al., 1994; EPIPHANIO et al., 2010; BARBOSA et al., 2012; MATTAR et al., 2014), o que dificulta a quantificação do IAF através dos IVs.

O café é uma cultura perene de crescimento contínuo, cuja abscisão foliar está associada com a precipitação e com a duração do dia. A perda de folhas ocorre na época seca, por promover a diminuição dos níveis de carboidratos nas folhas. Os frutos são importantes drenos de carboidratos, portanto, o desfolhamento causado pelas secas e altas temperaturas são mais severos durante a frutificação e após a colheita (RENA; MAESTRI, 1986).

São poucos os estudos sobre o desenvolvimento foliar do cafeeiro. Segundo Valência (1973) o valor ótimo de IAF para o café arábica é 8, a partir deste valor o auto-sombreamento interno reduziria a eficiência fotossintética da cultura e provocaria redução do potencial de produção. Em estudo realizado com o café arábica variedade colômbia, Arcila-Pulgarín e Chaves-Córdoba (1995) observaram que o IAF variou tanto com a densidade do plantio quanto com a idade da planta, onde a cultura atingiu IAF máximo de 9,8 para densidade de 10.000 plantas.ha⁻¹ e 9,1 para a densidade de 5.000 plantas.ha⁻¹. Entretanto, segundo os autores, não foi verificada correlação significativa entre o desenvolvimento foliar e a produção cafeeira. Em lavoura de café Rubi, Rezende et al. (2014) observaram que o IAF tende a aumentar com o aumento da densidade de plantio e é variável ao longo do ano, sendo influenciado principalmente pela colheita e ocorrência de doenças.

De acordo com Bréda (2003), alterações no índice de área do dossel são seguidas por mudanças na produtividade, tornando sua quantificação importante ao bom desempenho da modelagem de produtividade. Porém, é escassa a pesquisa de estimativa de índice de área foliar a partir de métodos não destrutivos, tais como medições indiretas e/ou sensoriamento remoto (CAMPOS, 2009; TAUGOURDEAU et al., 2014).

3.3.4 Calibração, validação e análise de sensibilidade do modelo

Conhecidos os parâmetros de entrada, faz-se a calibração do modelo através do ajuste de parâmetros para que os valores de saída modelados tenham maior relação com os valores reais (SANDS; LANDSBERG, 2002; BALOKOSKI et al., 2010). Na etapa de validação o objetivo é confirmar se os resultados obtidos por meio do modelo calibrado representam de fato a realidade, em relação às informações observadas e que não tenham sido utilizadas na etapa anterior (BOOTE et al. 1996). A precisão dos resultados modelados depende da qualidade dos dados de entrada, das unidades de simulação, da calibração e do próprio modelo (FAIVRE et al., 2004).

A espacialização está associada à mudança de escala que por sua vez pode corresponder à passagem de uma pequena escala para uma escala maior (agregação ou *upscaling*) ou à passagem de uma grande área para uma menor (desagregação ou *downscaling*).

Comumente assume-se que é possível estimar os valores efetivos dos parâmetros do modelo na escala superior e vice-versa mantendo inalterada a estrutura do modelo e a mudança de escala fica associada principalmente aos dados de entrada e/ou saída (FAIVRE et al., 2004).

Os dados obtidos por satélite têm um grande potencial de utilização, pois podem fornecer informação sobre grandes áreas da superfície terrestre. Entretanto, os dados devem ser combinados com dados coletados em campo para uma melhor e mais completa análise do meio agrícola. A obtenção de dados de campo é imprescindível para os levantamentos agrícolas. Embora os dados de produtividade não sejam dados de entrada, eles são utilizados para avaliar o desempenho do modelo. A produtividade real (Y_r) é definida como a produtividade efetivamente alcançada no campo, em uma região geográfica delimitada (VAN ITTERSUM et al., 2013). Erros nos resultados simulados podem estar associados a erros de amostragem aleatória e de cálculo incorreto da área amostrada (LUIZ, 2003; FAIVRE et al., 2004). Além disso, os modelos são projetados para um uso específico e, portanto, parâmetros são estimados e modelos são calibrados em uma amostra de pequenas parcelas. Além disso, os modelos são validados em um número limitado de condições. Porém na prática esses modelos são usados em áreas mais amplas e é preciso analisar o uso dos modelos nas unidades ou escalas fora do seu domínio de validade, pois os modelos podem ter respostas diferentes em escalas distintas (FAIVRE et al., 2004).

Deve-se proceder a análise de sensibilidade do modelo, na qual é investigada a contribuição dos dados de entrada à variação na resposta do modelo. A aplicação da análise de sensibilidade permite decompor a variação da saída do modelo em relação às entradas, individualizar fatores com maior influência sobre a resposta final e que devem ser medidos ou modelados com maior precisão, a fim de atingir um dado nível de precisão na saída do modelo (CROSETTO et al., 2000).

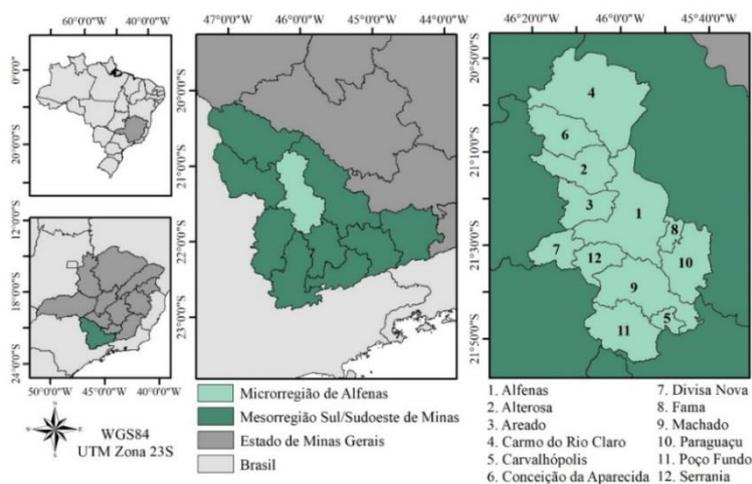
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

Nesta pesquisa foram considerados os níveis hierárquicos de propriedade, municípios, microrregião e mesorregião. Os testes foram realizados na fazenda Conquista localizada no município de Alfenas na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais. As lavouras de café nesta propriedade foram utilizadas na análise de ajuste do modelo em nível de fazenda. Em seguida foram feitas Análises em nível regional, de microrregião e municipal utilizando áreas cafeeiras da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas e Microrregião de Alfenas. O mapa temático de distribuição das lavouras cafeeiras da área teste foi cedido pelos responsáveis da fazenda Conquista e o mapa temático da distribuição das lavouras cafeeiras da Mesorregião foi cedido pelo projeto CAFESAT/INPE.

Região serrana localizada entre as coordenadas geográficas latitudes 21° e 23° Sul e longitudes 44° e 47° Oeste (**Figura 4.1**), a mesorregião Sul/Sudoeste de Minas é a principal produtora de café de Minas Gerais, com aproximadamente ≈21% da produção de café arábica brasileira.

Figura 4. 1 Localização da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas e da microrregião de Alfenas.



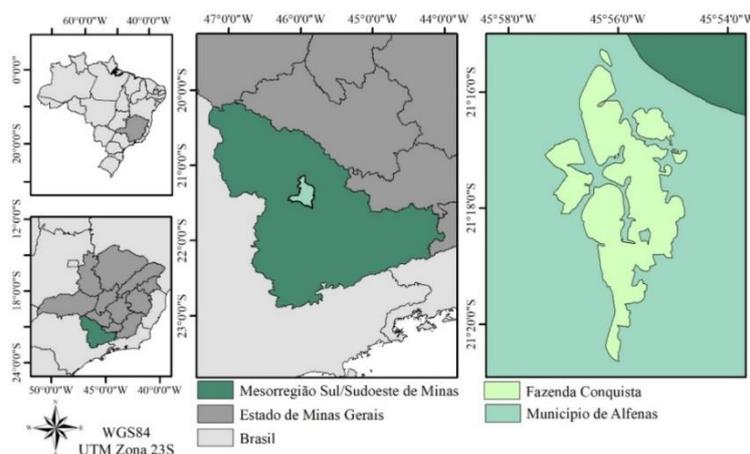
Fonte: Autor.

De clima subtropical, a mesorregião possui estações climáticas bem definidas, com estação seca no inverno e a estação chuvosa no verão. De acordo com o sistema de classificação climática de Köppen, os climas predominantes da área são: Cwb - clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno; Cwa - clima subtropical de inverno seco e verão quente; Cfb - clima temperado, com chuvas bem distribuídas e verão ameno (ALVARES et al., 2013; EMBRAPA, 2018). A área é formada por vegetação de Cerrado e Mata atlântica (IBGE, 2010). O mapa da cobertura vegetal da área está disponível no Apêndice F (**Figura F.3**).

As produtividades das áreas cafeeiras da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas, da Microrregião de Alfenas e dos municípios de Alfenas, Alterosa, Areado, Carmo do Rio Claro, Carvalhópolis, Conceição da Aparecida, Divisa Nova, Fama, Machado, Paraguaçu, Poço Fundo e Serrania para os anos safra de 2010/11 a 2014/15 foram obtidas do sistema SIDRA/IBGE (Sistema IBGE de Recuperação Automática).

A fazenda Conquista, situada no município de Alfenas no Estado de Minas Gerais, está localizada entre as coordenadas geográficas 45°59'25''O, 21°14'57''S e 45°54'0''O, 21°20'26''S (**Figura 4.2**). Com uma área cafeeira de 1.531,51 ha e cultivo predominantemente irrigado, a fazenda cultiva predominante, o café arábica das variedades Acaiaí, Mundo Novo e, em menor escala, Catuaí Amarelo, Rubi Vermelho e Topázio.

Figura 4. 2 Localização da fazenda Conquista em Alfenas – MG.



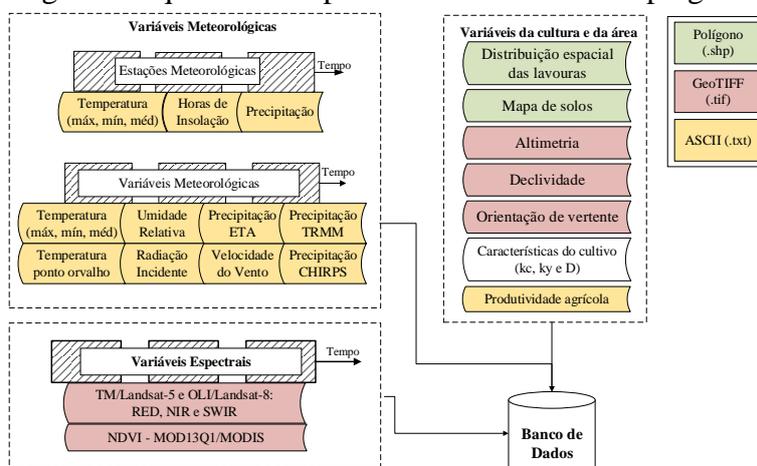
Fonte: Autor.

Os solos da área pertencem à ordem do Argissolo e Latossolo. A fazenda, de topografia plana, possui plantios de café entre 780 e 850 m de altitude. O clima da região é do tipo Cwb, com inverno seco e verão ameno, onde a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C (ALVARES et al., 2013; EMBRAPA, 2018).

4.2 Dados utilizados e abordagem metodológica

Na **Figura 4.3** mostram-se as variáveis de entrada dos modelos agrometeorológicos-espectrais derivados de Doorenbos e Kassam (1979) e Picini (1998) e as etapas de desenvolvimento do estudo com uso dos dados MODIS são mostradas na **Figura 4.4**.

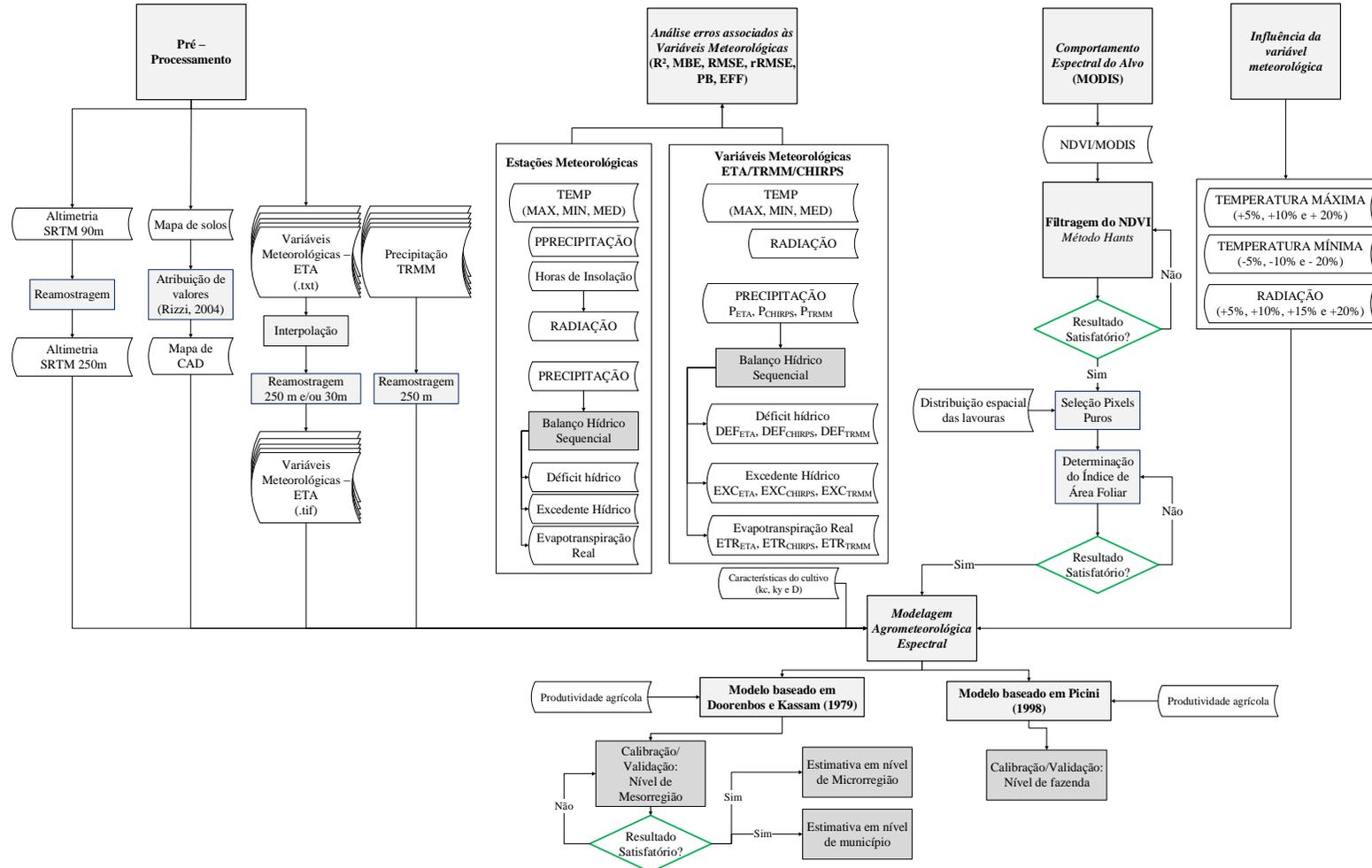
Figura 4.3 Diagrama esquemático representando os dados empregados na pesquisa.



Fonte: Autor.

(a) Modelo Digital de Elevação: Para efetuar a estimativa de produtividade com dados MODIS foram utilizados dados de altitude do SRTM (*Suttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 90 m (**Figura F.2**) adquiridos no endereço eletrônico http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/. As imagens foram mosaicadas e, posteriormente, os dados foram transformados para resolução espacial de 250m para que fossem compatíveis com os dados MODIS.

Figura 4.4 Diagrama esquemático representando as etapas metodológicas realizadas na aplicação dos dados NDVI/MODIS.



Fonte: Autor.

4.3 Variáveis meteorológicas de entrada do modelo de produtividade e análise de erros

Nesse item são descritos os dados meteorológicos de entrada do modelo de produtividade bem como os dados de estações do INMET utilizados na avaliação dos erros associados a eles.

4.3.1 Dados meteorológicos modelados e de sensoriamento remoto

Nesta pesquisa foram utilizadas as variáveis meteorológicas (velocidade do vento (m.s^{-1}), radiação solar incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), umidade relativa (%)) e temperaturas média ($^{\circ}\text{C}$), mínima ($^{\circ}\text{C}$) e máxima ($^{\circ}\text{C}$)) provenientes do modelo ETA – CPTEC com previsão de 24 horas geradas em 00 UTC (Coordenadas Universais de Tempo). No período de 2009 a 2011, as variáveis foram disponibilizadas em 4 horários (06, 12, 18 e 00 UTC) com resolução espacial de 20km, enquanto no período de 2012 a 2015 os dados foram disponibilizados em 8 horários (03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 e 00 UTC) com resolução espacial de 15 km.

Além disso, foram utilizados dados de precipitação do modelo ETA/CPTEC, os dados de precipitação TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation*). A modelagem numérica ETA foi desenvolvida pelo Instituto Hidrometeorológico da Iugoslávia e pela Universidade de Belgrado e operacionalizado pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). No Brasil os dados são fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (BLACK, 1994; CHOU, 1996).

A missão TRMM, parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a JAXA (*Japan Aerospace Exploration*), produz estimativas globais de precipitação com base em dados de sensoriamento remoto (ZULKAFI et al., 2014; NASA, 2017). O produto diário 3B42, utilizado nessa pesquisa, está disponível no endereço eletrônico <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/TRMM>, recobre uma área de 50°N a 50°S e tem resolução espacial de 0,25° (~ 25 km). O produto final é

derivado da combinação de estimativas de precipitação usando observações nos canais microondas e no infravermelho obtido a partir de satélites (NASA,2017).

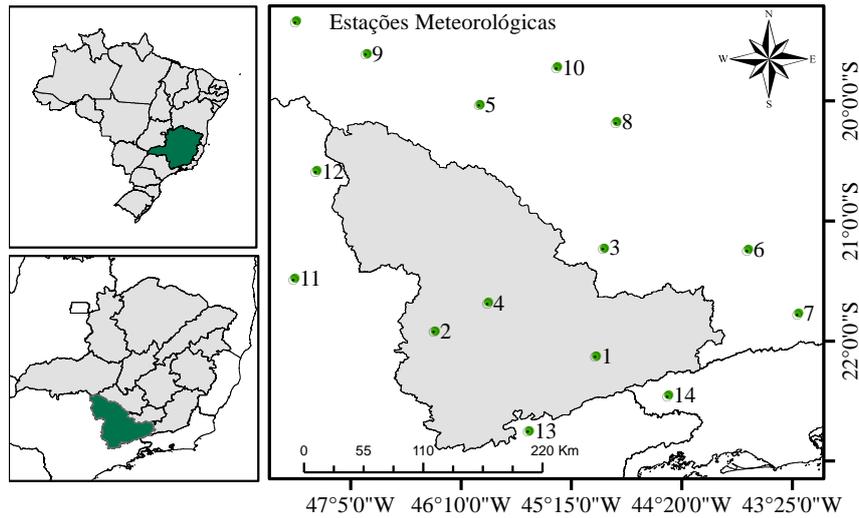
Os dados CHIRPS diários (versão CHIRPS v.2) foram obtidos no endereço eletrônico ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05. Segundo (FUNK et al., 2014), as principais fontes de dados utilizadas na criação de CHIRPS são: (i) o acumulado mensal climatológico de precipitação do CHPCLim; (ii) observações dos satélites geoestacionários no canal infravermelho (IR) de fontes de dados NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o produto do *Climate Prediction Center* (CPC) e o B1 IR do *National Climatic Data Center* (NCDC); (iii) a precipitação estimada pelo TRMM; (iv) o campo de chuva do modelo atmosférico *NOAA Climate Forecast System*, versão 2 (CFSv2) e (v) observações de precipitação in situ obtidas a partir de serviços meteorológicos nacionais e regionais. O dado tem resolução espacial de aproximadamente 5,3 km (0,05°) com cobertura de 50°S-50°N e 180°L-180°O.

As equações utilizadas na adequação das variáveis para entrada no modelo de produtividade estão descritas no **Apêndice A (Tabela A.1)**.

4.3.2 Dados de estações meteorológicas do INMET

Para avaliar as estimativas de variáveis meteorológicas de entrada no modelo foram usados dados meteorológicos diários de temperatura (máxima, média e mínima; °C), precipitação (mm.dia⁻¹) e insolação solar (h) no período de 2009 a 2015 que foram coletadas em catorze estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo três estações localizadas dentro e as demais circunvizinhas à Região Sul/Sudoeste de Minas Gerais/Brasil. Todas elas localizadas entre as latitudes 21° e 23° Sul e as longitudes 44° e 47° Oeste (**Figura 4.5**).

Figura 4.5 Localização espacial das estações meteorológicas.



Fonte: Autor.

As estações utilizadas são identificadas pelo nome da cidade, latitude, longitude e altitude na **Tabela 4.1** e a disponibilidade dos dados por estação está descrita na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.1 Localização das Estações Meteorológicas.

Nº	Estação	Estado ⁽¹⁾	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
1	São Lourenço	MG	-22,13	-45,04	930,65
2	Poços de Caldas	MG	-21,92	-46,38	1077,08
3	Lavras	MG	-21,23	-44,98	916,19
4	Machado	MG	-21,68	-45,94	892,44
5	BambuÍ	MG	-20,03	-46,01	684,43
6	Barbacena	MG	-21,24	-43,78	1128,08
7	Juiz de Fora	MG	-21,77	-43,36	936,88
8	Divinópolis	MG	-20,17	-44,87	787,42
9	Araxá	MG	-19,61	-46,95	1018,32
10	Bom Despacho	MG	-19,72	-45,37	659,46
11	São Simão	SP	-21,48	-47,55	617,39
12	Franca	SP	-20,58	-47,37	1026,20
13	Campos do Jordão	SP	-22,75	-45,60	1642,00
14	Resende	RJ	-22,45	-44,44	439,89

¹ MG: Minas Gerais; SP: São Paulo; RJ: Rio de Janeiro.

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 Disponibilidade (✓) de dados por estação meteorológica.

Nº	Estação	P	h	UR	T _{MAX}	T _{MED}	T _{MIN}	BH ¹
1	São Lourenço	✓						
2	Poços de Caldas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Lavras	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Machado	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	BambuÍ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Barbacena	✓	✓	✓			✓	
7	Juiz de Fora	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Divinópolis	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	Araxá	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Bom Despacho	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	São Simão	✓	✓	✓				
12	Franca	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Campos do Jordão	✓						
14	Resende	✓	✓		✓	✓	✓	

¹ BH = balanço hídrico

Fonte: Autor.

4.3.3 Análise das estimativas de variáveis meteorológicas estimadas em relação aos dados INMET

Nesta etapa o objetivo foi avaliar a relação entre as variáveis temperatura (mínima, média e máxima) e radiação incidente do modelo ETA/CPTEC e das precipitações estimadas pelo ETA/CPTEC, TRMM e CHIRPS e os dados de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na Região Sul/Sudoeste de Minas Gerais/Brasil, com intuito de verificar a sua aplicabilidade em áreas com baixa densidade de estações. Além disso, procurou-se também avaliar o uso desses dados na determinação da evapotranspiração real, excedente e déficit hídrico obtidos do emprego do balanço hídrico sequencial (BHS).

O balanço hídrico é composto pelos fluxos de precipitação, evapotranspiração e escoamento, em conjunto com o armazenamento. Esses componentes são relacionados através da **Equação 4.1**, onde os fluxos de precipitação (P), evapotranspiração real (ETR) e excedente hídrico (EXC) são equilibrados pela mudança no armazenamento de água (S) no solo:

$$\pm\Delta S = P - ETR - EXC \quad (4.1)$$

Um método simples na determinação da disponibilidade de água é por meio do método proposto por Thornthwaith e Mather (1955), denominado de Balanço Hídrico Sequencial (BHS) no qual, a partir de dados de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e capacidade de água armazenada (CAD), pode-se determinar a deficiência hídrica (DEF), o excedente hídrico (EXC) e a evapotranspiração real da cultura (ETR).

A evapotranspiração potencial da cultura (ETP) foi determinada utilizando a equação de Penman-Monteith descrita em Allen et al. (1998). Nessa etapa, foram utilizados dados de temperaturas do ar (mínima, média e máxima (°C)), velocidade do vento a 2 metros de altura (m.s⁻¹), umidade relativa do ar (%) e horas de insolação (h), obtidos nas estações meteorológicas do INMET no período de Janeiro/2009 a Junho/2015. Posteriormente, as componentes DEF, EXC e ETR foram estimadas através da aplicação do balanço hídrico climatológico de (THORNTHWAITH; MATHER, 1955).

O BHS foi determinado separadamente para os dados de precipitação das estações meteorológicas, do modelo ETA e do TRMM e CHIRPS para o período de tempo considerado. Ressalta-se que para determinar o ponto onde a precipitação (P), atributo necessário à inicialização do balanço hídrico pelo método escolhido, era superior à evapotranspiração potencial (ETP) foi necessário considerar o início do período de estudo em Janeiro/2009. Entretanto, foram descritos nesse estudo apenas os períodos de julho/2009 a junho/2015.

Na comparação entre os dados INMET e os dados estimados foi utilizada a análise ponto a pixel, ou seja, o valor do ponto foi comparado ao valor do pixel correspondente à localização do ponto. Com a intenção de não incorporar incertezas aos valores, optou-se pela não interpolação dos valores pontuais para grade.

Para avaliar as diferenças entre as medidas de temperatura, radiação, precipitação, ETR e DEF, com as mesmas derivadas dos dados do INMET foram utilizados a média dos erros (MBE ou viés), a raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado

médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB), descritos abaixo (**Equações 4.2** a **4.7**). Além disso, foram utilizados coeficientes de correlação de determinação (R^2) e Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), esses valores foram submetidos a análise de significância através do valor-p da análise de regressão para $\alpha = 5\%$.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o) * (P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2 * \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_o)}{N} \quad (4.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_o)^2}{N}} \quad (4.4)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{P_o} \quad (4.5)$$

$$PB = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_o)}{\sum_{i=1}^N P_o} \quad (4.6)$$

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_o)^2}{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2} \quad (4.7)$$

em que: P_i = variável estimada; P_o = variável observada em estação meteorológica e \bar{P}_o = média dos valores observados em estações meteorológicas, N = número total de observações.

O MBE indica se os dados modelados são subestimados (valor negativo) ou superestimados (valor positivo) em relação aos dados observados. A RMSE é medida da magnitude média dos erros e será sempre um valor positivo. Quanto mais próximo de zero forem os valores de MBE e RSME, maior a precisão da modelagem. Os valores de EFF podem variar de menos infinito a 1, o valor 1 indica uma concordância perfeita. Em relação à estimativa rRMSE, segundo Franchito et al. (2009), são consideradas estimativas confiáveis de precipitação aquelas que apresentam rRMSE inferior a 50%.

4.4 Processamento dos dados NDVI/MODIS

Os dados de índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), produto MOD13Q1/MODIS (mosaico de 16 dias e resolução espacial de 250 m), foram obtidos gratuitamente no endereço eletrônico <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/5/>, no formato HDF (*Hierarchy Data Format*) e projeção Sinusoidal. Os dados foram convertidos para o formato TIFF (Coordenadas Geográficas - Datum WGS84) através do software MRT (*Modis Reprojection Tools*). Nesse estudo foi utilizado o *tile* h13v11 e imagens entre os anos de 2010 e 2015. A **Tabela 4.3** mostra as datas de aquisição das imagens MOD13Q1/MODIS por fase fenológica. As imagens de 177 a 353 (fases I e II) referem-se ano anterior à colheita do café, enquanto o as imagens de 1 a 161 (fases III e IV) referem-se ao ano da colheita cafeeira.

Tabela 4.3 Data de aquisição das imagens MOD13Q1/Terra e estágio fenológico do cafeeiro.

Estádio Fenológico	MÊS	DOY*	Período	Estádio Fenológico	MÊS	DOY	Período	
Repouso (Fase I)	JUL	177	26/06 a 11/07	Granação dos frutos (Fase III)	JAN	1	01/01 a 16/01	
	JUL	193	12/07 a 27/07		JAN	17	17/01 a 1/02	
	AGO	209	28/07 a 12/08		FEV	33	02/02 a 17/02	
	AGO	225	13/08 a 28/08		FEV	49	18/02 a 5/03	
Florada, chumbinho e expansão dos frutos (Fase II)	SET	241	29/08 a 13/09		MAR	65	6/03 a 21/03	
	SET	257	14/09 a 29/09		MAR	81	22/03 a 6/04	
	OUT	273	30/09 a 15/10		Maturação dos frutos (Fase IV)	ABR	97	07/04 a 22/04
	OUT	289	16/10 a 31/10			ABR	113	23/04 a 08/05
	NOV	305	01/11 a 16/11	MAI		129	09/05 a 24/05	
	NOV	321	17/11 a 02/12	MAI		145	25/05 a 09/06	
	DEZ	337	03/12 a 18/12	JUN		161	10/06 a 25/06	
	DEZ	353	19/12 a 03/01					

*DOY: dia do ano

Fonte: Autor.

4.4.1 Filtragem de dados pelo algoritmo de análise harmônica HANTS

Com o intuito de corrigir os dados em relação às falhas pela presença de nuvens ou más condições atmosféricas e permitir o acompanhamento do ciclo da cultura ao longo do seu desenvolvimento, os dados MOD13Q1 foram submetidos à filtragem pelo método da análise harmônica utilizando o algoritmo Hants (*Harmonic Analysis of NDVI Time-Series*) implementado em MATLAB por Abouali (2011). A seleção da análise harmônica para filtragem dos dados se deu em função dos resultados apresentados por Adami (2010), que demonstrou a eficiência do filtro na remoção de ruídos em séries temporais dos índices de vegetação dos dados MODIS.

4.4.2 Seleção de pixels puros

A partir do mapa de classificação das áreas cafeeiras, foi gerada uma máscara de cultivo com tamanho de pixels de 250m (compatíveis com as imagens MODIS) para seleção de dados em “pixels puros”, ou seja, com 100% de ocupação com a cultura do café. Posteriormente, foram extraídos valores dos índices de vegetação NDVI para eventual estudo do comportamento espectral da cultura em campo.

4.5 Determinação da produtividade cafeeira

Conforme definido anteriormente, nesta pesquisa, foram testados dois modelos: o modelo descrito por Doorenbos e Kassam (1979) e o modelo aditivo proposto por Picini (1998). A ambos os modelos agrometeorológicos foram introduzidos os valores do IAF, estimados a partir do índice de vegetação NDVI.

O modelo de Doorenbos e Kassam (1979), expressa a produtividade real (Y_r) em função da penalização da produtividade máxima (Y_p) pelo déficit hídrico, estimado a partir da relação entre evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR). O modelo é descrito pela equação:

$$Y_r = \sum_{i=1}^n Y_p * \left[1 - k_y \left(1 - \frac{ETR}{ETP} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$IP = k_y \left(1 - \frac{ETR}{ETP} \right) \quad (4.9)$$

em que: Y_r = produtividade real, [kg.ha⁻¹]; Y_p = produtividade potencial, [kg.ha⁻¹]; k_y = fator de resposta à produtividade e varia de acordo com o estágio fenológico da cultura; ETR = evapotranspiração real, [mm.dia⁻¹]; ETP = evapotranspiração potencial, [mm.dia⁻¹]; IP = índice de penalização parcial ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, [adimensional].

O modelo aditivo proposto por Picini (1998), modificado de Doorenbos e Kassam (1979), visa minimizar a interferência da bienalidade do cafeeiro sobre a produtividade real (Y_r), incorporando ao modelo a produtividade do ano anterior (Y_{aa}) e o coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior (k_{y_o}). O modelo é descrito segundo a Equação 4.10.

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \left[k_{y_o} \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) + \sum_{i=1}^n k_{y_i} \left(1 - \frac{ETR}{ETP} \right) \right] \quad (4.10)$$

em que: Y_r = produtividade real, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; Y_p = produtividade potencial, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; Y_r/Y_p = produtividade relativa; Y_{aa} = produtividade do ano anterior, [kg.ha⁻¹ de café beneficiado]; ETR = evapotranspiração real, [mm.dia⁻¹]; ETP = evapotranspiração potencial, [mm.dia⁻¹]; k_{y_o} = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior; k_{y_i} = fator de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos do cafeeiro.

Na determinação da produtividade potencial pode-se adotar o valor da mais alta produtividade obtida na série analisada (PICINI, 1998; SANTOS, 2005). Entretanto, com o intuito de incluir no modelo a variável espectral, a produtividade potencial foi determinada segundo método descrito em Doorenbos e Kassam (1979) no qual a produtividade potencial pode ser obtida conforme **Equação 4.11**:

$$Y_p = F_{cc} * F_r * FPA * ND * PMB \quad (4.11)$$

em que: F_{cc} = fator de compensação do crescimento; F_r = fator de respiração; FPA = fator de produtividade agrícola; ND = número de dias; PMB = produção de matéria seca bruta do grupo da cultura [kg.ha⁻¹].

A variável espectral foi introduzida na modelagem através da relação entre o Índice de área foliar e o fator de compensação de crescimento (F_{cc}) definido por Berka et al. (2003) e expresso na **Equação 4.12**.

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,644 - (0,515 * IAF))} \quad (4.12)$$

em que: F_{cc} = fator de compensação do crescimento; IAF = índice de área foliar estimado com o uso de sensoriamento remoto.

Como reforçam Campos (2008) e Taugourdeau et al. (2014), é escassa a pesquisa sobre a distribuição angular de folhas em cafeeiros, bem como métodos indiretos de medição de seus parâmetros agronômicos. Desse modo, objetivou-se testar quatro métodos indiretos de determinação do IAF. Os métodos empregados nessa pesquisa são descritos na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 Equações utilizadas na determinação do índice de área foliar do cafeeiro.

Equação	Equação	Fonte
1	$F_c = 1 - \left[\frac{IV_{max} - IV}{IV_{max} - IV_{min}} \right]^\eta$	Choudhury et al. (1994)
2	$F_c = 1,1101 * NDVI - 0,08577$	Jiménez-Muñoz et al. (2005)
3	$IAF = \left(-0,603 * \left(\frac{1}{\log(NDVI)} \right) \right) - 0,289$	Taugourdeau et al. (2014)
4	$IAF = 0,41 * \exp(2,53 * NDVI)$	Silva et al. (2015)

em que: F_c = fração do solo coberto pela cultura; IV_{max} e IV_{min} = valores de máximo e de mínimo do índice de vegetação da área de cultivo; IV = valor do índice de vegetação de cada pixel da área cultivada pela cultura; $\eta = \left(\frac{k}{k'} \right)$, k = entre 0,5 e 0,7; k' = entre 0,8 e 1,3 ($IV = NDVI$), nesse caso $\eta = 0,9$; IAF = índice de área foliar para cada pixel da imagem.

Fonte: Autor.

No caso dos modelos de Choudhury et al. (1994) e Jiménez-Muñoz et al. (2005), em que, primeiramente se estima a fração do solo coberto pela cultura (F_c), o índice de área foliar foi estimado pelo método de Norman et al. (2003) descrito na **Equação 4.13**:

$$IAF = -2 * \ln(1 - F_c) \quad (4.13)$$

em que: IAF = índice de área foliar; $[m^2.m^{-2}]$; F_c = fração do solo coberto pela cultura.

A modelagem da produtividade agrícola real consiste na determinação da produtividade potencial (Y_p), determinação das evapotranspirações real (ETR) e potencial (ETP) e, finalmente, parametrização, validação e calibração do modelo, sendo a determinação da produtividade real a etapa final do processo. Todas as equações referentes à determinação da produtividade potencial estão descritas no **Apêndice B**, enquanto as determinações das evapotranspirações potencial e real estão descritas nos **Apêndices C** e **D**, respectivamente.

O índice de penalização parcial é dependente da relação entre k_y e das evapotranspirações máxima e real da cultura, desse modo, presume-se que quanto maiores os valores de k_y e menores as relações entre ETR/ETP, maior será a penalização parcial a que a produtividade parcial estará sujeita. Portanto, quanto maior IP, maior a penalização parcial.

A **Tabela 4.5** apresenta os valores de fator de resposta da produção (k_y) estimados por Santos (2005) e utilizados na estimativa da penalização da produtividade por estresse hídrico. De acordo os valores estimados de k_y , o cafeeiro é pouco prejudicado pelo estresse hídrico durante as fases de maturação e repouso, entretanto, nas fases de florada, chumbinho e expansão, o déficit hídrico é muito prejudicial à planta (k_y elevado), portanto, é maior a penalização da produtividade da cultura. A dependência hídrica do cafeeiro diminui na fase de granação, chegando a valores mínimos em março, na transição entre o grão em formação e a maturação.

Tabela 4.5 Valores do fator de resposta da produção (k_y) por período e fase fenológica cafeeira.

Fase	Mês	DOY	k_y	Fase	Mês	DOY	k_y
Repouso	JUL	177	0,06	Granação dos frutos	JAN	1	0,36
		193	0,06		17	0,30	
	AGO	209	0,00		33	0,18	
		225	0,00		49	0,12	
Florada, chumbinho e expansão dos frutos	SET	241	0,06		65	0,00	
		257	0,78		81	0,00	
	OUT	273	0,78		97	0,00	
		289	0,72		113	0,00	
	NOV	305	0,66	129	0,06		
		321	0,66	145	0,06		
	DEZ	337	0,54	Maturação dos frutos	JUN	161	0,18
		353	0,42				

Fonte: Adaptada de Santos (2005).

Nas estimativas das produtividades parcial e final foram considerados três estádios fenológicos do café para análise dos modelos, conforme Camargo e Camargo (2001): (I) estágio de dormência das gemas florais/início do florescimento: ocorre nos meses de julho – agosto (DOY 177 a DOY 225); (II) estágio de florescimento/início de formação dos grãos: ocorre entre os meses de setembro – outubro – novembro – dezembro (DOY 241 a DOY 353); e (III) estágio de formação dos grãos/início de maturação: ocorre entre os meses de janeiro-fevereiro-março (DOY 1 a DOY 81). Com a intenção de que a produtividade fosse estimada com antecedência à colheita, a fase de maturação (estádio IV que ocorre de abril a junho) não foi considerada na modelagem. Para efeito de produtividade, foram testadas diferentes combinações entre as fases para os períodos analisados (**Figura 4.6**).

Figura 4.6 Teste de combinação das fases cafeeiras para determinação da produtividade.

Fases	D – IFL ⁽¹⁾				FL – IFG ⁽²⁾								FG – IM ⁽³⁾						
	DOY	177	193	209	225	241	257	273	289	305	321	337	353	1	17	33	49	65	81
Combinação	1	████████████████████																	
	2					██													
	3													██					
	4	██																	
	5					██													
	6	████████████████████												██					
	7	██																	

⁽¹⁾D – IFL: estágio de dormência das gemas florais/início do florescimento; ⁽²⁾FL – IFG: estágio de florescimento/início de formação dos grãos e ⁽³⁾FG – IM: estágio de formação dos grãos/início de maturação.

Fonte: Autor.

4.6 Análise estatística da produtividade do cafeeiro

Os valores de IAF, obtidos por diferentes métodos foram utilizados no modelo agrometeorológico-espectral para estimar a produtividade do café. Os valores médios de IAF foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($\alpha = 5\%$).

Os valores da produtividade estimados através da modelagem foram comparados com dados de produtividade coletada a campo. As diferenças entre os valores de produtividade de campo e a produtividade modelada foram avaliadas através da análise de variância (ANOVA), da determinação do coeficiente de determinação (R^2), o erro médio absoluto (MAE), a média dos erros (MBE), a raiz do quadrado médio dos erros (RMSE) e a raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) descritos no **item 4.3.3**.

As produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral aplicado a mesorregião, a microrregião e aos municípios, foram comparadas com as produtividades disponibilizadas pelo IBGE e analisados estatisticamente através do teste T – student pareado ($\alpha = 95\%$), no qual foram considerados as seguintes hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_A):

$$\begin{cases} H_0: \mu_{IBGE} = \mu_{MOD} \\ H_A: \mu_{IBGE} \neq \mu_{MOD} \end{cases}$$

Nesse caso, se p-valor < 0,05 ($\alpha = 95\%$) a hipótese nula é rejeitada, ou seja, existe diferença entre as produtividades fornecidas pelo IBGE e as produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral.

4.7.1 Amostragem e intervalos de confiança

A partir da área de pixels puros de café na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas determinou-se o tamanho da amostra através da fórmula proposta por Cochran (1977) e Thompson (2002), segundo a **Equação 4.14**:

$$n = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 * p * q}{E^2} \quad (4.14)$$

em que: n = número de pixels amostrados entre os pixels puros; Z = valor crítico tabelado da função normal padrão = 1,96; α = nível de confiança = 0,95; p = percentual de área de pixels puros; q = (1 - p) = percentual d área ocupada com outras ocupações; E = erro percentual de amostragem = 1%.

Foram feitas 2000 amostragens aleatórias simples (AAS)² de tamanho 304 dentro da população de pixels puros. Para cada uma das 2.000 amostras aleatórias foram calculadas a média amostral, o desvio padrão e o coeficiente de variação, em seguida o comportamento dos dados foi descrito graficamente.

A média amostral (\bar{X}), o desvio padrão amostral (s_m) e o coeficiente de variação (CV_m) das amostras aleatórias foram calculados pelas **Equações 4.15, 4.16 e 4.17**:

$$\bar{X}_m = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.15)$$

$$s_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4.16)$$

$$CV_m = 100 * \frac{s_m}{\bar{X}_m} \quad (4.17)$$

² Seleção de uma amostra de n elementos de um total populacional de N, de tal forma que qualquer possível amostra tenha a mesma probabilidade de ser escolhida (LUIZ, 2009).

4.7 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade é usada na avaliação do efeito da mudança do dado de entrada nos valores de saída do modelo de produtividade. Conhecendo-se “a priori” os erros associados ao modelo ETA na área de estudo, separadamente e enquanto os outros parâmetros do modelo não são alterados, os dados de entrada de radiação solar incidente e temperatura mínima sofreram decréscimos de -5%, -10%, -20% -30, e -5%, -10%, -20%, respectivamente, e os dados de entrada de temperatura máxima sofreram acréscimos de +5%, +10% e +20%, conforme metodologia descrita em Benke et al. (2008) e Lemos Filho et al. (2010).

A análise da sensibilidade do modelo à variação dos dados de entrada sobre a produtividade modelada foi feita através da diferença relativa entre as produtividades de referência e a produtividade relativa a variável na simulação (**Equação 4.18**):

$$S_{PROD} = \frac{PROD_{Rel} - PROD_0}{PROD_0} \quad (4.18)$$

em que: S_{PROD} = coeficiente de sensibilidade relativa; $PROD_0$ = produtividades de referência; $PROD_{Rel}$ = produtividade relativa a variável na simulação.

Quanto mais sensível o modelo, maiores serão os valores do coeficiente de sensibilidade, enquanto valores próximos a zero indicam baixa sensibilidade à mudança de variável (LEMOS FILHO et al., 2010).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise dos erros associados às variáveis meteorológicas

Nos itens a seguir serão analisadas as correlações dos dados de temperatura e de radiação estimados pelo modelo ETA e os dados do INMET. Além disso, serão analisadas as precipitações e os componentes do balanço hídrico climatológico, tais como excedente hídrico, déficit hídrico e evapotranspiração real determinados com o emprego de dados observados do INMET e estimados do modelo ETA e de sensoriamento remoto TRMM e CHIRPS. Ressalta-se que as análises dos erros associados às estimativas de precipitação estão descritas em Nogueira et al. (2018).

5.1.1 Análise da correlação entre dados de temperatura observados e estimados

Na **Figura 5.1** e **Figura 5.2** são apresentados os indicadores estatísticos MAE, MBE, RMSE e rRMSE e coeficiente de determinação (R^2) entre as temperaturas observadas em estações do INMET e as temperaturas estimadas pelo ETA.

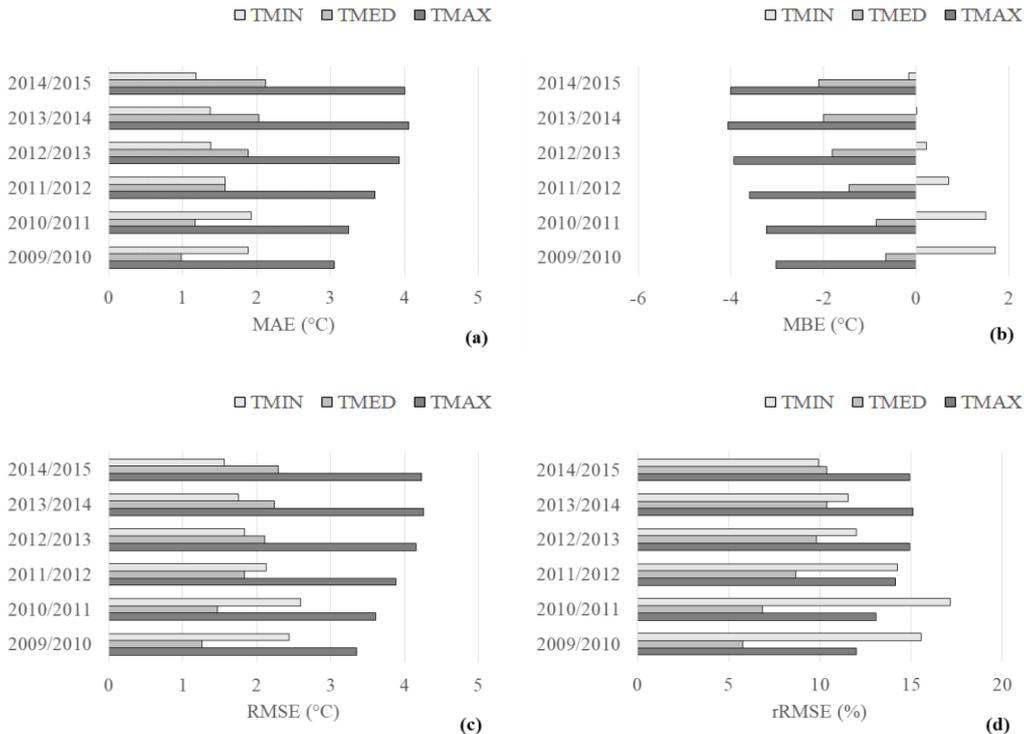
Em relação à temperatura máxima, os dados do ETA apresentaram temperaturas menores do que as temperaturas observadas para toda a série de temporal usada na análise, o que é confirmado pelo MBE negativo (**Figura 5.1.b**) indicando que houve subestimativa do modelo ETA em relação aos dados de estação meteorológica. O modelo ETA apresentou erro médio absoluto (MAE) entre 3°C e 4°C, nota-se crescimento do erro do ano-safra de 2009/10 a 2014/15. O rRMSE manteve-se entre 12% (2009/2010) e 15% (2013/14). Resultados similares de subestimativa da temperatura máxima dos dados ETA e erros MAE entre 3°C e 5°C foram observados por Sugawara (2010) para o Estado de São Paulo.

Em geral o modelo ETA apresentou temperaturas mínimas mais elevadas do que as observadas nas estações terrenas (MBE positivo) nos quatro primeiros anos analisados, todavia, o comportamento se inverteu nos anos safra 2013/14 e 2014/15, coincidindo com os anos de baixa precipitação na região (**Figura 5.5**). Valores de MBE próximos de zero em 2013/14 indicaram que o MBE foi afetado pelos erros positivos e negativos de

mesma magnitude que se cancelaram na somatória da **Equação 4.3**. De maneira geral, nota-se que houve diminuição dos erros (MAE, RMSE e rRMSE) de $TMIN_{ETA}$ em relação ao $TMIN_{INMET}$ no decorrer dos anos safra, com aumento dos coeficientes de determinação (R^2).

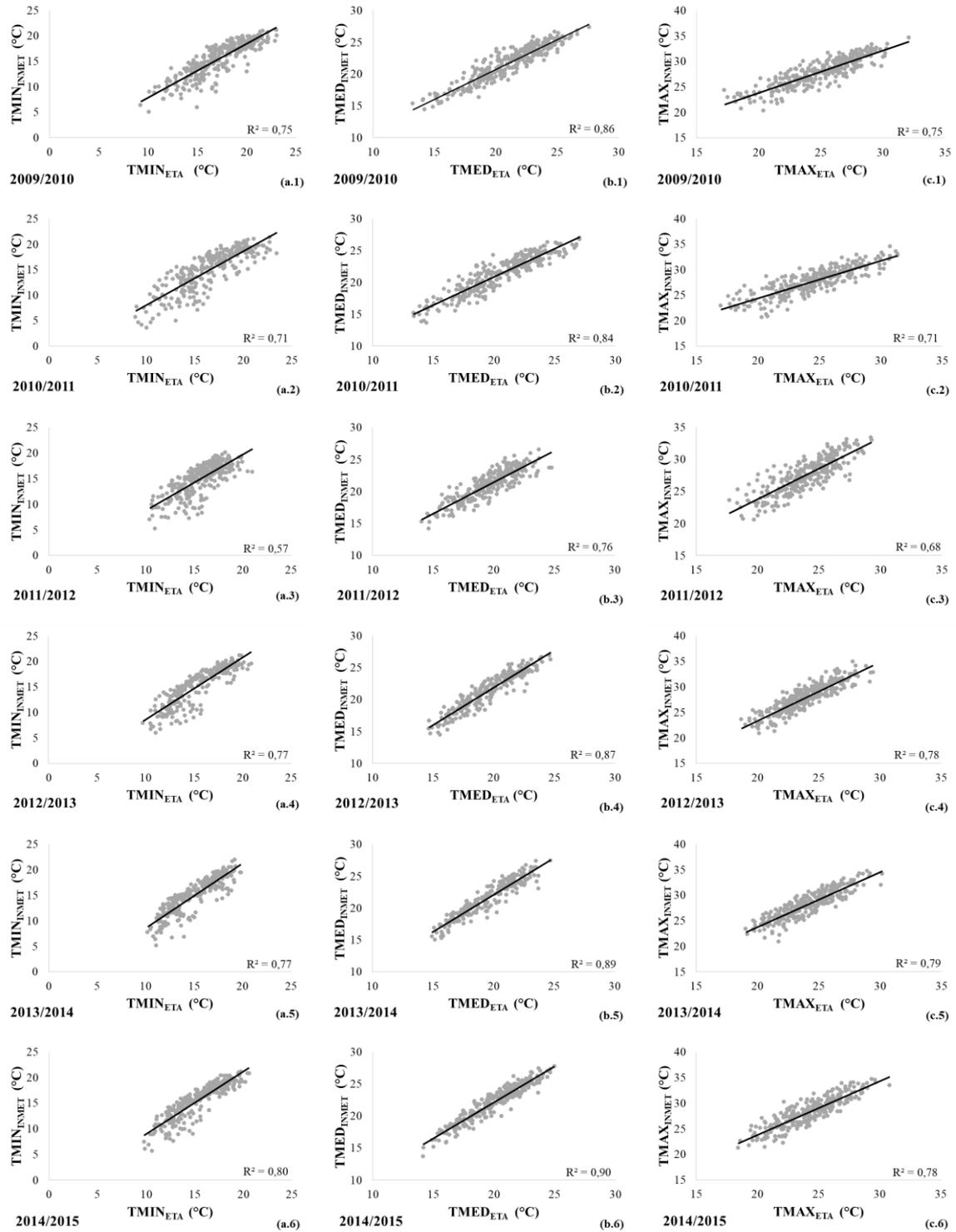
As temperaturas médias previstas são próximas das observações nas estações, o fato se reflete nos valores de R^2 entre 0,76 (2011/12) e 0,90 (2014/15). Assim como ocorreu com a temperatura máxima, a temperatura média possui viés negativo em todo o período, indicando que a temperatura ETA é menor do que a temperatura INMET. O dado apresenta média dos erros absolutos baixos ($<2,5^{\circ}C$) e erro relativo inferior a 12%.

Figura 5.1 Análise estatística entre as temperaturas observadas nas estações meteorológicas e as temperaturas estimativas ETA: (a) Média dos erros absolutos (MAE; $^{\circ}C$), (b) Média dos erros (MBE; $^{\circ}C$), (c) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE; $^{\circ}C$) e (d) Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE; %).



Fonte: Autor.

Figura 5.2 Temperaturas (a) mínima (°C), (b) média (°C) e (c) máxima (°C) do ETA versus as observações do INMET para os anos safras de: (1) 2009/10, (2) 2010/11, (3) 2011/12, (4) 2012/13, (5) 2013/14 e (6) 2014/15.



Fonte: Autor.

Na **Tabela 5.1** são apresentadas as métricas de desempenho dos produtos ETA em relação às estações meteorológicas na determinação das temperaturas máxima, média e mínima no período de Jul/09 a Jun/15. MBE negativos indicam que ETA tende a subestimar as temperaturas máxima e média, enquanto superestima a temperatura mínima (MBE positivo). A temperatura média apresenta maior concordância com os dados de estação que é expressa pelo R^2 de 0,81, seguido pelas temperaturas máxima ($R^2 = 0,72$) e mínima ($R^2 = 0,68$). Os erros relativos rRMSE são de 8,74%, 13,71% e 14,06% para as temperaturas média, mínima e máxima, respectivamente. De acordo com Hölbig et al. (2015) a informação extraída da grade do modelo representa o valor médio daquela grade, o que torna inconsistente sua comparação com valores pontuais de estações.

Tabela 5.1 Coeficientes de determinação (R^2), Média dos erros absolutos (MAE), média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) para as temperaturas máxima, média e mínima no período de jul/09 a jun/15.

Variável	R^2	MAE (°C)	MBE (°C)	RMSE (°C)	rRMSE (%)
TMAX	0,72	3,64	-3,63	3,92	14,06
TMED	0,81	1,60	-1,45	1,89	8,74
TMIN	0,68	1,57	0,68	2,10	13,71

Fonte: Autor.

Segundo Camargo et al. (2003), a cultura cafeeira é afetada pela ocorrência de temperaturas máxima superiores a 34° C na fase de florada e de temperaturas mínimas inferiores a 2°C. A subestimativa dos valores de temperatura máxima e superestimativa da temperatura mínima, podem ocultar efeitos negativos do componente térmico sobre o desenvolvimento da cultura em campo, o que pode limitar o emprego da informação no monitoramento da cultura em campo.

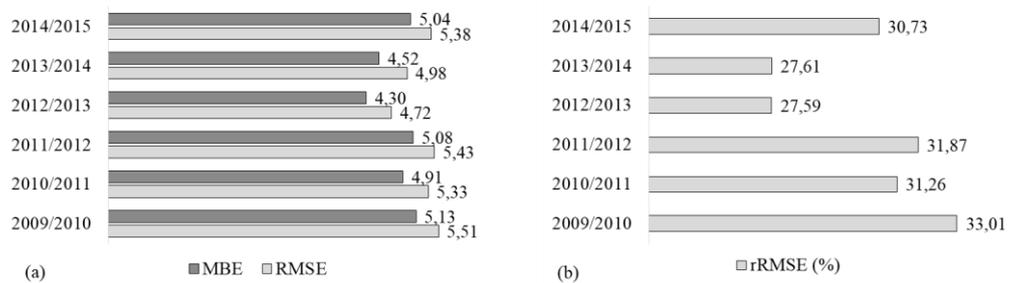
5.1.2 Correlação entre dados observados e estimados de radiação de onda curta incidente

Nas **Figura 5.3** e **5.4**, são apresentados os desempenhos dos dados ETA em relação às estimativas INMET por ano safra, com base nos indicadores estatísticos: Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e coeficiente de determinação (R^2).

O RMSE apresentou variação de $4,72 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (2012/13) a $5,51 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (2009/10). O MBE oscilou entre 4,30 e $5,13 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, os valores positivos indicam que houve superestimativa dos dados ETA em relação aos dados INMET em todo os anos analisados. A radiação ETA apresentou baixa concordância com os dados INMET, com erro rRMSE variando entre 27,59% (2012/13) e 33% (2009/10). Os maiores erros foram observados nos três primeiros períodos, cujos dados apresentavam resolução espacial de 20 km, enquanto os melhores resultados ocorrem nos períodos posteriores com resolução espacial de 15km.

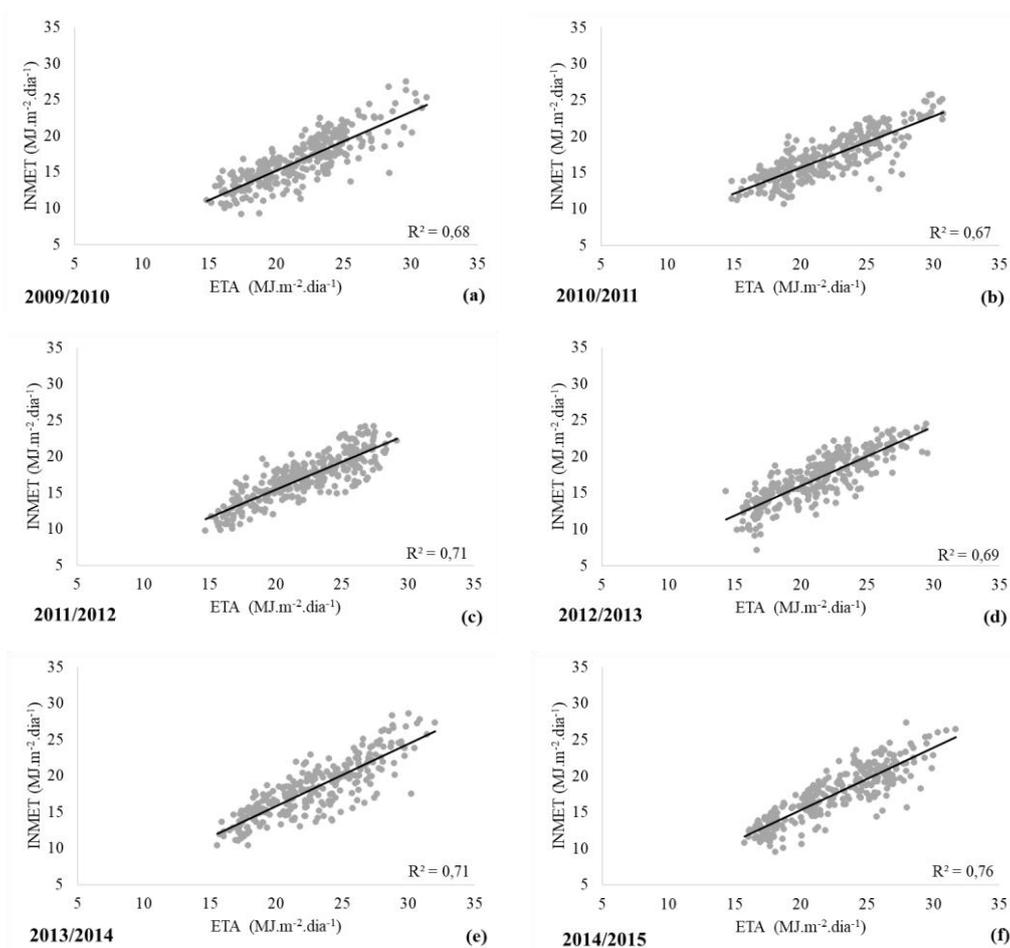
Os coeficientes de determinação variaram entre 0,67 e 0,76, com menores resultados nos anos 2010/2011 ($R^2 = 0,67$) e 2009/2010 ($R^2 = 0,68$), os melhores resultados ocorreram nos anos 2013/2014 ($R^2 = 0,71$) e 2014/2015 ($R^2 = 0,76$), anos de maiores secas e estiagem na região (**Figura 5.5**).

Figura 5.3 Análise estatística entre a radiação de estações meteorológicas e a estimativa ETA: (a) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE) e Média dos erros (MBE) em MJ.m⁻².dia⁻¹ e (b) Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRSME; %).



Fonte: Autor.

Figura 5.4 Radiação de onda curta incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) do ETA versus as observações do INMET para os anos safra de: (a) 2009/10, (b) 2010/11, (c) 2011/12, (d) 2012/13, (e) 2013/2014 e (f) 2014/15.



Fonte: Autor.

As análises de desempenho do dado ETA em relação ao dado do INMET para o período total de julho/09 a junho/15 são apresentadas na **Tabela 5.2**. O MBE do período revelou que houve superestimava de $4,83 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A concordância moderada do ETA com dados INMET no período é descrita pelo valor R^2 (0,70) e pelo valor elevado de rRMSE (~30%).

Tabela 5.2 Coeficientes de determinação (R^2), Média dos erros absolutos (MAE), média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) para a radiação de onda curta incidente no período de jul/09 a jun/15.

Variável	R^2	MAE (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	MBE (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	RMSE (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	rRMSE (%)
RAD	0,70	4,83	4,83	5,23	30,35

Fonte: Autor.

Pinto et al. (2010) observaram superestimativa da média da radiação solar à superfície do modelo regional ETA para toda a América Latina. Segundo os autores o erro pode estar relacionado com a parametrização de nuvens usada pelo CPTEC. Fernandez et al. (2004) comentam que é necessário ajustar os esquemas de convecção, de formação de nuvens (microfísica) e a dos processos à superfície para que haja melhora do desempenho do modelo. Tarasova et al. (2006) alteraram a parametrização do regime de radiação solar do modelo ETA e observaram melhores resultados do fluxo em superfície tanto para condições de céu claro como nublado. Segundo os autores os erros associados a radiação após as alterações da parametrização podem estar relacionados com a descrição incorreta dos parâmetros de nuvens no modelo.

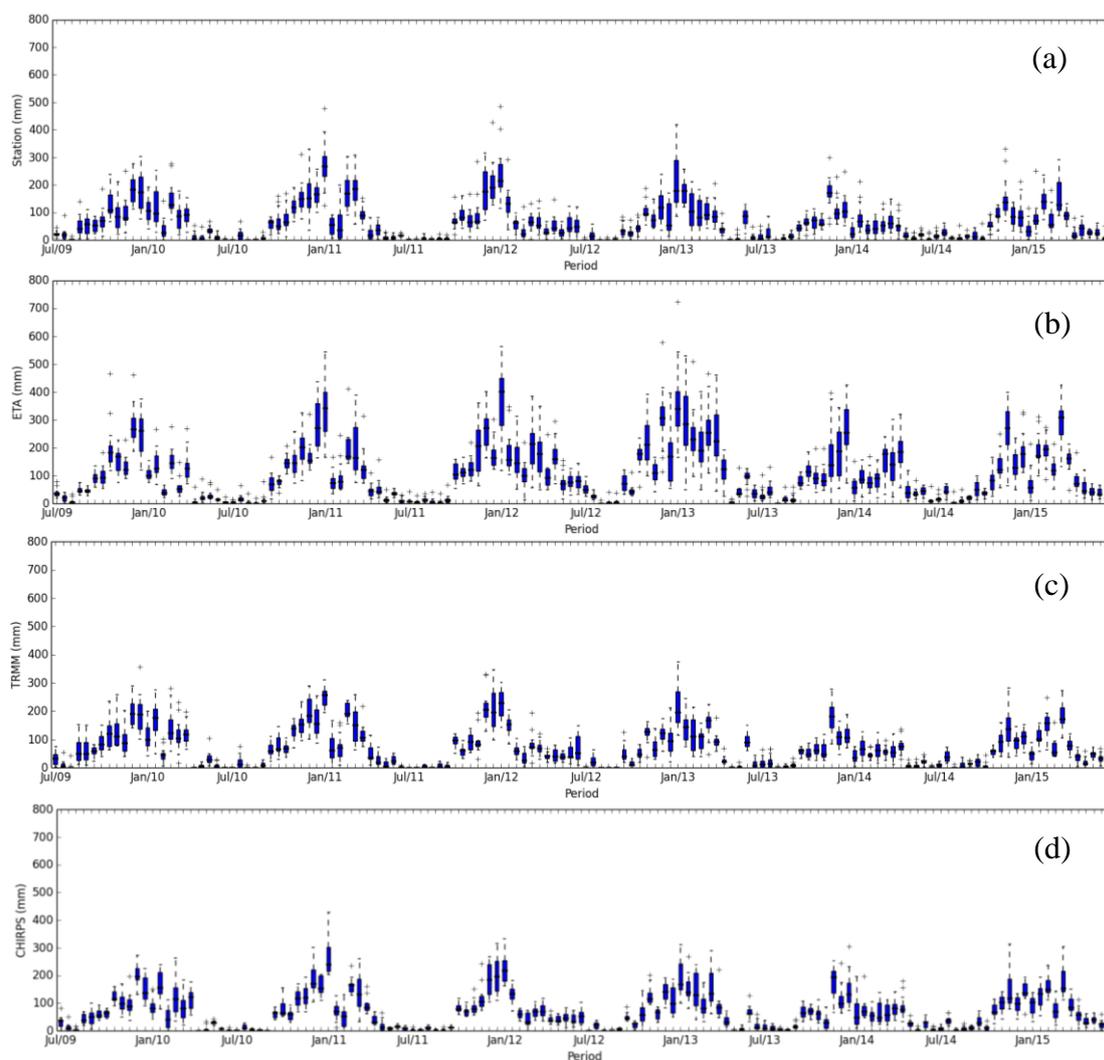
A radiação é, juntamente com a temperatura média, determinante na determinação da matéria seca bruta (PMB) e, conseqüentemente, na estimativa da produtividade determinada pelo modelo agrometeorológico-espectral. A superestimativa da radiação podem afetar a aplicação do modelo de rendimento, podendo causar superestimativa da produtividade modelada em relação a produtividade real de campo.

5.1.3 Análise dos dados de precipitação estimados pelo modelo numérico ETA e por meio de sistemas de sensoriamento remoto TRMM e CHIRPS

O comportamento dos valores das precipitações obtidos a partir de estações meteorológicas e estimadas pelo ETA, TRMM e CHIRPS para os períodos de julho/2009 a junho/2015 é apresentado nas **Figura 5.5** e **Figura 5.6**. Nota-se que o período chuvoso geralmente se iniciou entre setembro-outubro, com concentração de

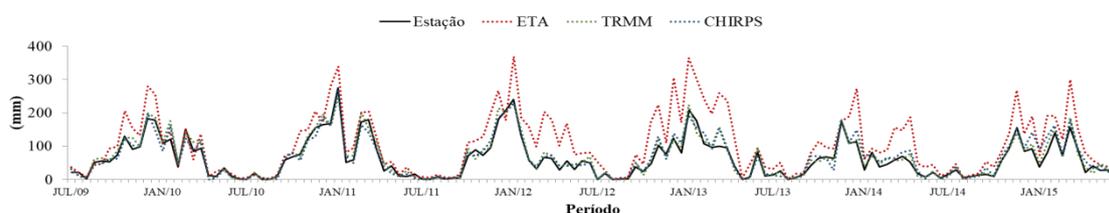
precipitação nos meses de verão (dezembro a fevereiro), enquanto os períodos secos geralmente ocorreram entre março e agosto. Da **Figura 5.5** nota-se que, diferentemente dos dados ETA, a distribuição da precipitação dos dados TRMM e CHIRPS seguiu a variação dos dados de estação em todos os períodos analisados.

Figura 5.5 Distribuição da precipitação acumulada observados em: (a) catorze estações meteorológicas do INMET e estimada pelo (b) ETA, (c) TRMM e (d) CHIRPS entre julho/2009 a junho/2015, para a região Sul/Sudoeste de Minas – MG.



Fonte: Autor.

Figura 5.6 Distribuição da precipitação acumulada média estimada pelo ETA, TRMM, CHIRPS e em catorze estações meteorológicas do INMET, entre julho/2009 a junho/2015, para a região Sul/Sudoeste de Minas – MG.



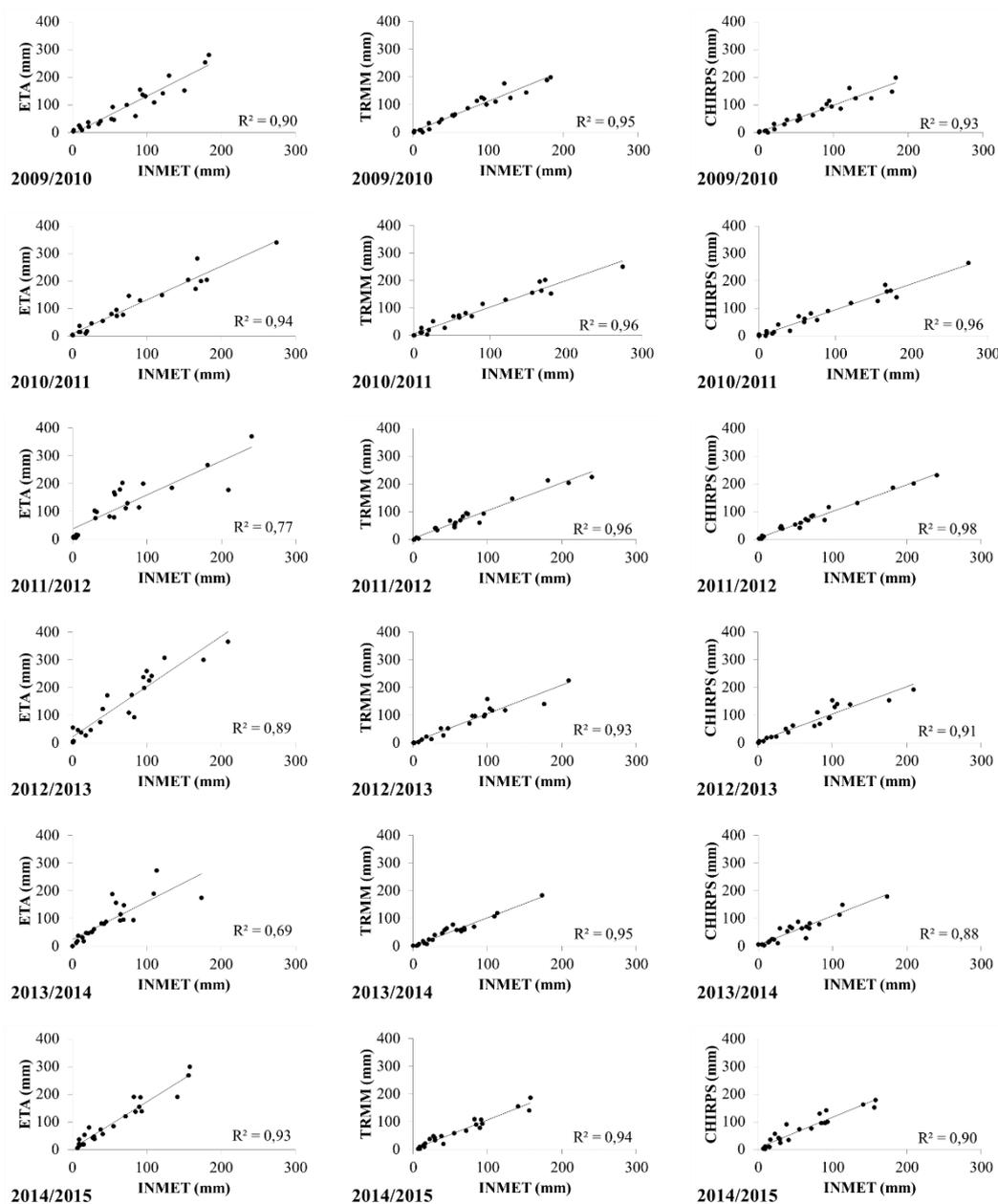
Fonte: Autor.

Na **Figura 5.7**, as precipitações médias acumuladas do INMET são plotadas contra as estimativas de precipitação média acumulada do ETA, TRMM e CHIRPS separadamente para cada ano-safra. Em relação aos dados do ETA, os coeficientes de determinação variaram entre 0,69 (13/14) e 0,94, com destaque para o ano safra 2010/11, ano de maior precipitação média. Para os dados TRMM os coeficientes de determinação foram maiores do que 0,90 em todos os anos-safra, com mínimo de 0,93 (12/13) e máximo de 0,96 (11/12), enquanto os dados CHIRPS apresentaram R^2 variando entre 0,88 e 0,98. Os melhores resultados entre CHIRPS e INMET foram obtidos nos anos-safra 2011/12 ($R^2 = 0,98$) e 2010/11 ($R^2 = 0,96$) e os menores coeficientes foram observados nos anos-safra 2013/14 ($R^2 = 0,88$) e 2014/15 ($R^2 = 0,90$).

Na análise de dados ETA a partir da **Figura 5.8**, observa-se que a média dos erros (MBE) foi positiva em todos os anos, o que leva a afirmar que houve superestimativa da precipitação do modelo em relação aos dados do INMET, resultado condizente com os valores positivos de PB. A raiz do quadrado médio dos erros (RMSE) variou entre 37,45mm (2009/10) e 93,47mm (2012/13), com maiores valores nos anos de 2011/12 (70,04 mm) e 2012/13. A correlação (R) entre os dados observados e os dados estimados pelo modelo ETA variou de 0,83 (2013/2014) a 0,97 (2010/11). A partir do teste – t pareado ($\alpha = 0,05$) verificou-se que houve diferença significativa entre os dados de estação e os dados estimados pelo modelo ETA. Apesar dos altos valores de R (0,83 a 0,97) observou-se baixo valor de EFF (-1,66 a 0,74), o que indica baixa correspondência entre os dados observados e estimados. Como pode ser visto, os

valores de rRMSE são superiores a 50% (exceto para o ano safra 10/11) o que indica que as medidas ETA são pouco confiáveis para o período analisado.

Figura 5.7 Precipitação (mm) do INMET versus as estimativas de precipitação do ETA, TRMM e CHIRPS por ano safra.



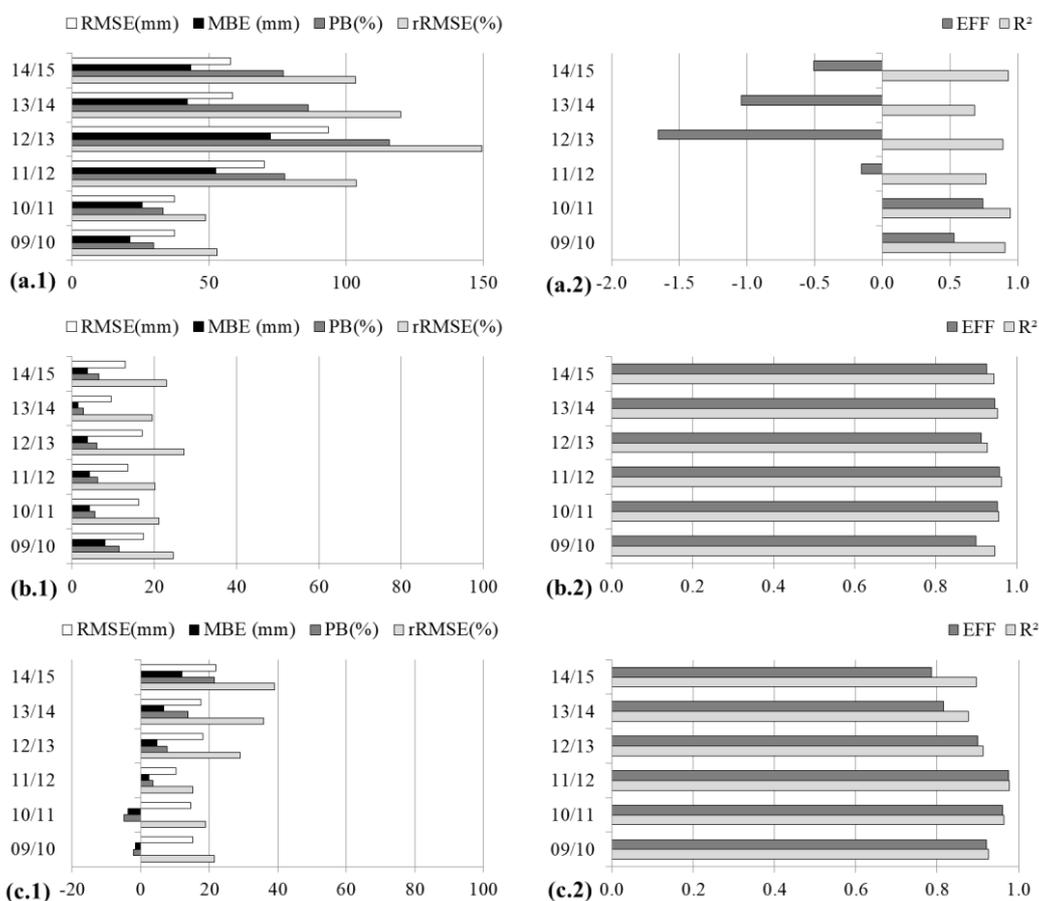
Fonte: Autor.

Segundo Meireles et al. (2009), na cultura cafeeira as chuvas no período de setembro a março, seguido de um período relativamente seco entre abril a agosto, favorece

significativamente a frutificação e a produção do café. Ainda de acordo com os mesmos autores, o período chuvoso beneficia a formação dos “chumbinhos” e a granação dos frutos, enquanto a maturação e a colheita são favorecidas pelo período relativamente seco. Se fossem considerados apenas os valores da precipitação estimados por meio do modelo ETA as estimativas de produtividade das lavouras cafeeiras poderiam ser superestimadas, uma vez que nas fases de formação e granação dos grãos as precipitações obtidas através do ETA foram superiores aqueles observados nas estações meteorológicas. Resultado similar de superestimativa dos dados ETA para região de Minas Gerais foi observado em VIEIRA et al. (2009).

Com relação aos dados do TRMM (**Figura 5.8**), os valores de RMSE variaram entre 9,51mm (2013/14) e 17,33mm (2012/13) e os valores de MBE mantiveram-se inferiores a 9mm. A análise de regressão entre os dados observados e estimados apresentou uma correlação superior a 0,90. O valor EFF variou de 0,90 a 0,96, o que indicou que os dados estimados apresentam alta concordância com os observados. Verificou-se valor PB positivo dos valores TRMM em relação aos dados medidos, entretanto, apresentaram valores inferiores às estimativas do modelo ETA. Verificou-se que não houve diferença significativa entre os dados da estação e as estimativas TRMM, exceto para o ano safra 2009/2010 (teste – t, $\alpha = 5\%$).

Figura 5.8 (1) Raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), Média dos erros (MBE), Raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE; %) e Média dos erros percentual (PB; %); (2) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF) e coeficiente de correlação (R) entre a precipitação (PREC) de estações meteorológicas e estimada para o (a) ETA, (b) TRMM e (c) CHIRPS.



Fonte: Autor.

Ainda em relação à **Figura 5.8**, os valores de RMSE dos dados CHIRPS variaram de 10,25mm (2011/12) a 21,85mm (2014/15). Quando comparado aos outros dados estimados, verificou-se que os valores de RMSE anuais foram inferiores ao apresentado pelo ETA e inferior ao apresentado pelo TRMM nos anos de 2009/10 a 2011/12, entretanto, nos anos subsequentes, houve aumento dos erros do CHIRPS em relação ao TRMM. A análise dos valores de MBE indicou subestimativa dos valores CHIRPS para os anos 2009/10 e 2010/11 e superestimativa nos anos posteriores. Valores elevados do índice EFF mostram alta correspondência entre os valores observados e estimados.

Entretanto, verificou-se que houve diferença significativa entre os dados de estação e as estimativas CHIRPS no ano safra 2014/15. Discrepâncias entre os dados observados e CHIRPS também foram relatados por Paredes-Trejo et al. (2017), segundo os autores o fato pode estar associado a diminuição do número de estações utilizadas na criação dos dados CHIRPS no decorrer dos anos.

As análises de desempenho dos produtos precipitação ETA, TRMM e CHIRPS em relação à precipitação INMET para o período total de julho/09 a junho/15 são apresentadas na **Tabela 5.3**. Os valores de MBE do período revelaram superestimativa de 42,8mm, 4,21mm e 3,45mm para ETA, TRMM e CHIRPS, respectivamente. A alta concordância do TRMM e CHIRPS com dados INMET é descrito pelos altos valores de EFF e R, ambos superiores a 0,90.

Tabela 5.3 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para a precipitação no período de jul/09 a jun/15.

Dado	R	R^2	EFF	MBE (mm)	RSME (mm)	rRMSE (%)	PB (%)
ETA	0,90	0,80	0,42	42,81	62,24	97,57	67,11
TRMM	0,97	0,95	0,97	4,21	14,70	23,05	6,60
CHIRPS	0,96	0,92	0,96	3,45	16,68	26,14	5,42

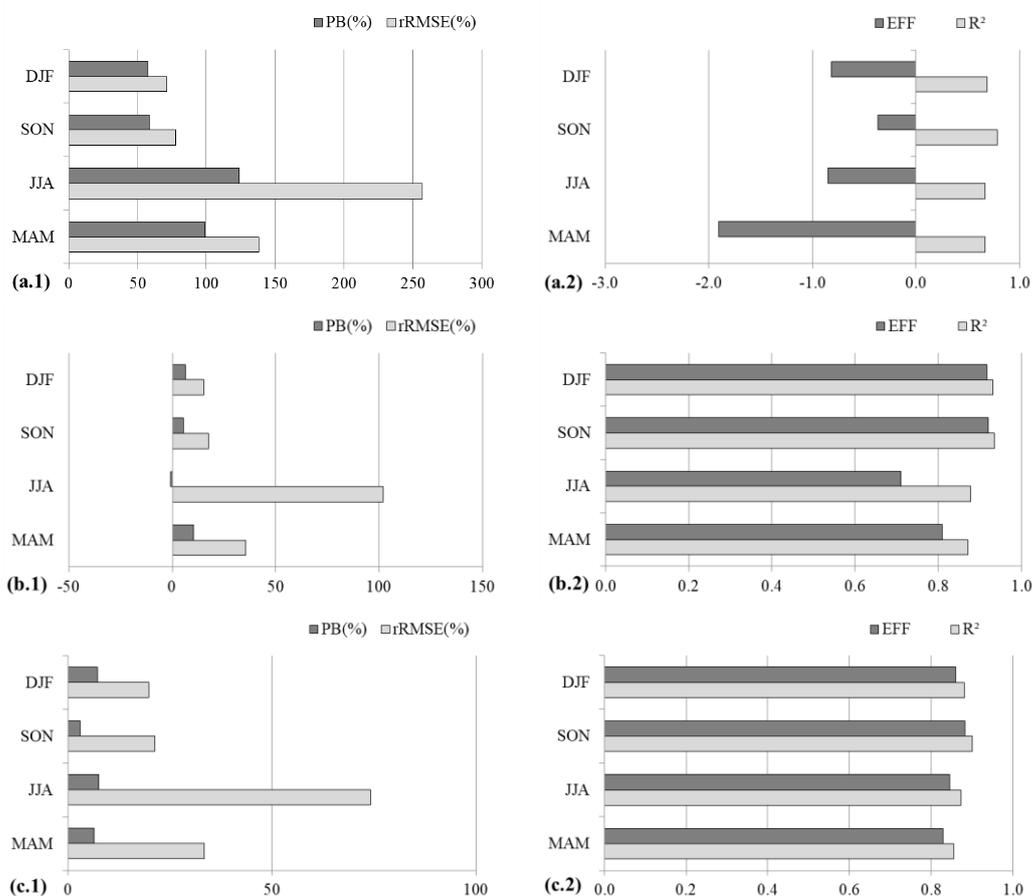
Fonte: Autor.

Na **Figura 5.9** são mostradas as variações sazonais para os períodos de dezembro a fevereiro (DJF), de março a maio (MAM), de junho a agosto (JJA) e de setembro a novembro (SON) dos erros MBE, RMSE, PB (%) e rRMSE (%) e dos coeficientes R e EFF entre os dados ETA, TRMM e CHIRPS e os dados do INMET. Em relação aos dados ETA, verificou-se baixa correspondência entre os valores estimados e observados, com métrica EFF baixos ($EFF < 0$) para todos os períodos e rRMSE e PB superiores a 50%, além disso, houve diferença significativa entre as médias (teste-t pareado; $\alpha < 0,05$) para os 4 períodos analisados.

Como pode ser observado (**Figura 5.9**), os coeficientes de correlação entre os dados do INMET e os dados TRMM e CHIRPS são elevados para a maioria dos períodos. O coeficiente de correlação dos dados TRMM são superiores a 90% em todos os períodos, sendo os valores mais elevados de R observados nos períodos SON (97%) e DJF (97%). O *percent bias* foi negativo apenas para o período JJA (-0,87) e inferior a 11% em todas as estações, o valor mais alto de PB ocorrem nos períodos de DJF (6,49%) e MAM (10,42%). Verificou-se que o valor de rRMSE é inferior a 50% na em MAM (35,38%), SON (17,65%) e DJF (15,33%). No entanto, rRMSE é alto em JJA (101,85%), concordando com valor de EFF (0,71) o que indicou que a estimativa nesse período não é confiável pois o erro excede 50% da quantidade de precipitação de observada. Resultados similares foram reportados por Franchito et al. (2009).

Ainda de acordo com a **Figura 5.9**, nota-se que os valores do produto CHIRPS tendem a superestimar a precipitação em relação aos dados do INMET (PB positivo). Os valores elevados de R (>90%) e EFF (>0,80) indicaram boa correspondência entre os valores estimados e os valores observados do INMET para os períodos de setembro a maio (SON-DJF-MAM), entretanto, o valor rRMSE de 74% em JJA, indica que o dado é pouco confiável nesse período.

Figura 5.9 Variações sazonais (1) PB e rRMSE e (2) EFF e R por períodos (DJF, SON, JJA e MAM) entre a precipitação de estações meteorológicas e estimada pelo (a) ETA, (b) TRMM e (c) CHIRPS



Fonte: Autor.

5.1.4 Balanço hídrico com base nos dados das estações meteorológicas

Nesta seção foram avaliados os componentes do balanço hídrico climatológico: excedente hídrico, déficit hídrico e evapotranspiração real determinados com o emprego de dados observados nas estações do INMET e estimados do modelo ETA e de sensoriamento remoto TRMM e CHIRPS. As avaliações foram feitas comparando-se separadamente os dados médios acumulados das estações (**Tabela 4.2** – coluna BH) com dados médios ETA, TRMM e CHIRPS.

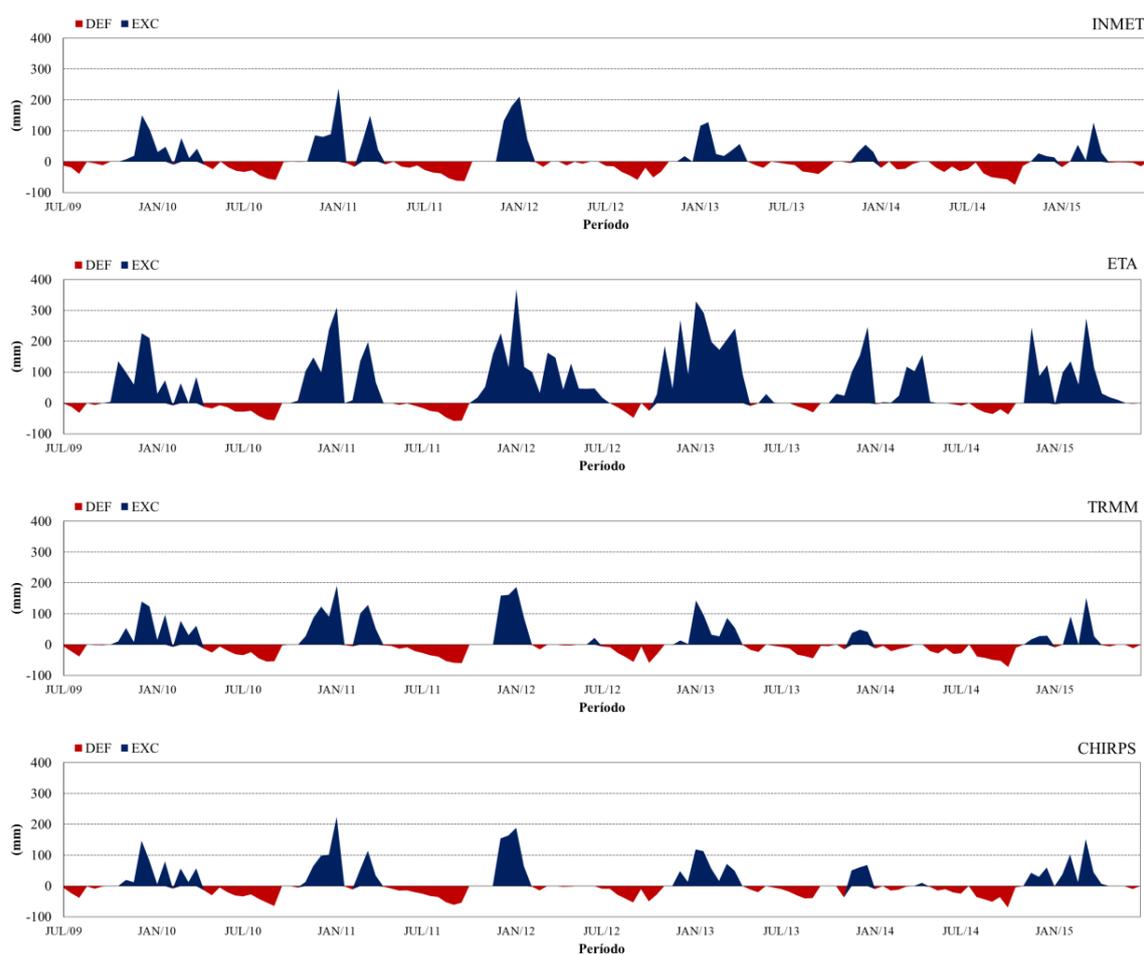
A **Figura 5.10** apresenta os componentes excedente e déficit hídrico estimados através do balanço hídrico sequencial segundo Thornthwaite e Mather (1955). Em relação aos dados observados em estações meteorológicas do INMET (**Figura 5.10**) pode-se verificar que:

- Nos anos 2009/10 houve estiagens no período de julho/09 a agosto/09. No período de setembro/09 a início de novembro/09, apesar de não haver excedentes, a demanda evapotranspirativa foi atendida. O excedente hídrico foi observado entre o final de novembro/09 a março/10. Já o período de abril/10 a junho/10 também é caracterizado por deficiência hídrica;
- No ano 2010/11, o déficit hídrico ocorreu de julho/10 a outubro/10 e de abril/11 a junho/11. Enquanto o excedente hídrico ocorreu de novembro/10 a março/11;
- No ano de 2011/12 observou-se que nos meses de julho/11 a outubro/11 e de fevereiro/12 a abril/12 houve deficiência hídrica, enquanto nos meses de novembro/11 e maio/12, apesar de não apresentarem deficiência, a precipitação não causou excedente hídrico;
- Em 2012/13, houve estiagens nos períodos de julho/12 a novembro/12 e abril/13 a junho/13, com excedentes hídricos de dezembro/12 a abril/13;
- Nos anos 2013/14 e 2014/15, com baixa precipitação (Figura 5.5), observou-se excedente hídrico apenas nos meses de novembro/13 a dezembro/13 e fevereiro/15 a março/15, respectivamente.

De maneira geral, nota-se que os dados de DEF e EXC obtidos com TRMM e CHIRPS apresentaram maior similaridade com os dados do INMET. Os dados do ETA além de superestimar os valores da precipitação, devido aos altos valores de excedente de água tendem a ocultar o déficit hídrico. Entre os meses de julho e agosto a deficiência hídrica pode se tornar benéfica, favorecendo uma florada mais uniforme, enquanto os déficits hídricos acentuados nos meses de setembro e outubro podem prejudicar o florescimento (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Essas características de cultivo podem ser encobertas nas análises baseadas apenas em dados ETA. No período de 2013/2014, por exemplo, os dados ETA não mostram a

deficiência hídrica de janeiro a março, devido a elevada precipitação estimada. A deficiência hídrica pode acelerar a maturação precoce do grão e o comprometimento da qualidade da bebida e o monitoramento das características da cultura em campo pode ser mascarado pelo uso do dado ETA de precipitação.

Figura 5.10 Valores médios da deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) estimados através do Balanço hídrico climatológico com uso de dados observados em estação meteorológicas do INMET e dos dados ETA, TRMM, CHIRPS, no período de Julho/09 a Junho/15.



Fonte: Autor.

Na **Tabela 5.4** são apresentadas as métricas de desempenho dos produtos ETA, TRMM e CHIRPS na determinação do déficit e excedente hídrico no período de Jul/09 a Jun/15. Em geral, MBE e PB(%) negativos indicam que os produtos tendem a subestimar o

déficit hídrico. Como pode ser verificado pelos altos valores de EFF e R, há alta correspondência entre DEF_{TRMM} e DEF_{CHIRPS} e a DEF_{INMET} , entretanto, o desempenho dos dados ETA mostrou-se inferiores ao TRMM e ao CHIRPS. Os erros relativos rRMSE foram de 83,27%, 30,63% e 45,28% para DEF_{ETA} , DEF_{TRMM} e DEF_{CHIRPS} , respectivamente. Na análise conjunta das métricas verificou-se que a DEF_{TRMM} apresentou maior correspondência com a DEF_{INMET} , com valores elevados de R, EFF, menores MBE e RMSE em comparação com DEF_{ETA} e DEF_{CHIRPS} .

Tabela 5.4 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para os déficit (DEF) e excedente (EXC) hídrico no período de jul/09 a jun/15.

Dado	R	R^2	EFF	MBE (mm)	RMSE (mm)	rRMSE (%)	PB (%)
DEFICIT HÍDRICO							
ETA	0,88	0,77	0,64	-6,15	10,80	83,27	-47,38
TRMM	0,98	0,95	0,95	-0,80	3,97	30,63	-6,14
CHIRPS	0,95	0,90	0,89	-1,56	5,87	45,28	-12,03
EXCEDENTE HÍDRICO							
-							
ETA	0,74	0,55	2,02	42,63	75,62	399,15	225,01
TRMM	0,96	0,92	0,92	2,40	12,69	66,99	12,65
CHIRPS	0,96	0,93	0,93	2,15	11,88	62,72	11,34

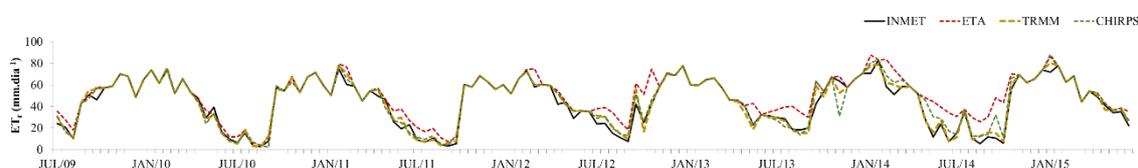
Fonte: Autor.

Com PB positivo, observou-se que EXC_{ETA} , EXC_{TRMM} e EXC_{CHIRPS} foram superestimados em relação ao EXC_{INMET} . Entretanto, os erros associados ao EXC_{ETA} foram superiores aos outros dados analisados, com rRMSE e PB elevados, de $\approx 400\%$ e 225% , respectivamente, enquanto EXC_{TRMM} e EXC_{CHIRPS} apresentam rRMSE inferiores a 70% e PB menores do que 13% . Os erros elevados concordam com baixos valores de R (74%) e de EFF (<0), indicando baixa concordância entre EXC_{ETA} e EXC_{INMET} . Nesse caso, o excedente hídrico se dá em função da superestimação da precipitação do modelo ETA.

Ainda de acordo com a **Tabela 5.4**, nota-se que EXC_{TRMM} e EXC_{CHIRPS} apresentam similaridade entre as métricas de desempenho, com R de 96% e EFF próximos de 1, além disso, ambos exibem MBE próximo de 2 mm e RMSE de cerca de 12mm. Os autores Shef-field et al. (2009) e Gao et al. (2010) em estudos utilizando dados de precipitação baseados em sensoriamento remoto, relatam que o escoamento calculado como um resíduo da equação do orçamento de água é superestimado, devido principalmente à superestimação da precipitação. Oliveira et al. (2014) relatam melhorias nos resultados de estimativa do escoamento usando dados TRMM v7 ao invés do TRMM v6.

Os valores médios da evapotranspiração real determinados com dados do INMET, ETA, TRMM e CHIRPS são mostrados na **Figura 5.11**. Os maiores valores de ET real são observados durante as estações chuvosas, com diminuição na passagem da estação chuvosa para a estação seca. De maneira geral, os valores ETR_{ETA} são superiores aos valores ETR_{INMET} , enquanto os valores ETR_{TRMM} e ETR_{CHIRPS} apresentam padrão semelhante aos ETR_{INMET} .

Figura 5.11 Valores médios de evapotranspiração real (ET_r) estimados através do Balanço hídrico climatológico com uso de dados do INMET e dos dados ETA, TRMM, CHIRPS, no período de Julho/09 a Junho/15.



Fonte: Autor.

A **Tabela 5.5** contém os resultados das análises estatísticas de cada produto para a evapotranspiração real. O MBE com valores positivos indica superestimativa da evapotranspiração real dos três produtos em relação à ETR_{INMET} , entretanto, EFF e R elevados sugerem alta concordância de ETR_{TRMM} e ETR_{CHIRPS} com ETR_{INMET} . A evapotranspiração real do TRMM apresentou melhor relação com os do INMET representados pelo R^2 alto de 0,94 e o RMSE mais baixo de $3,97 \text{ mm.dia}^{-1}$, com superestimativa representada pelo MBE de $0,80 \text{ mm.dia}^{-1}$ e PB de 1,82%. O produto

CHIRPS apresentou comportamento intermediário entre os outros dois produtos, com superestimativa de 3,57% e alta concordância com INMET representada por baixo rRMSE de 13,4% e EFF alto de 0,93. Em relação aos três produtos utilizados (ETA, TRMM e CHIRPS) na estimativa da evapotranspiração, os erros encontrados estão em concordância com o intervalo aceitável para estimativas de ETR descritos por Carrasco-Benavides et al. (2014) e Glenn et al. (2007).

Tabela 5.5 Coeficientes de correlação (R), de determinação (R²), de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF), Média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE), raiz do quadrado médio dos erros relativo (rRMSE) e Percent Bias (PB) para a evapotranspiração real no período de jul/09 a jun/15.

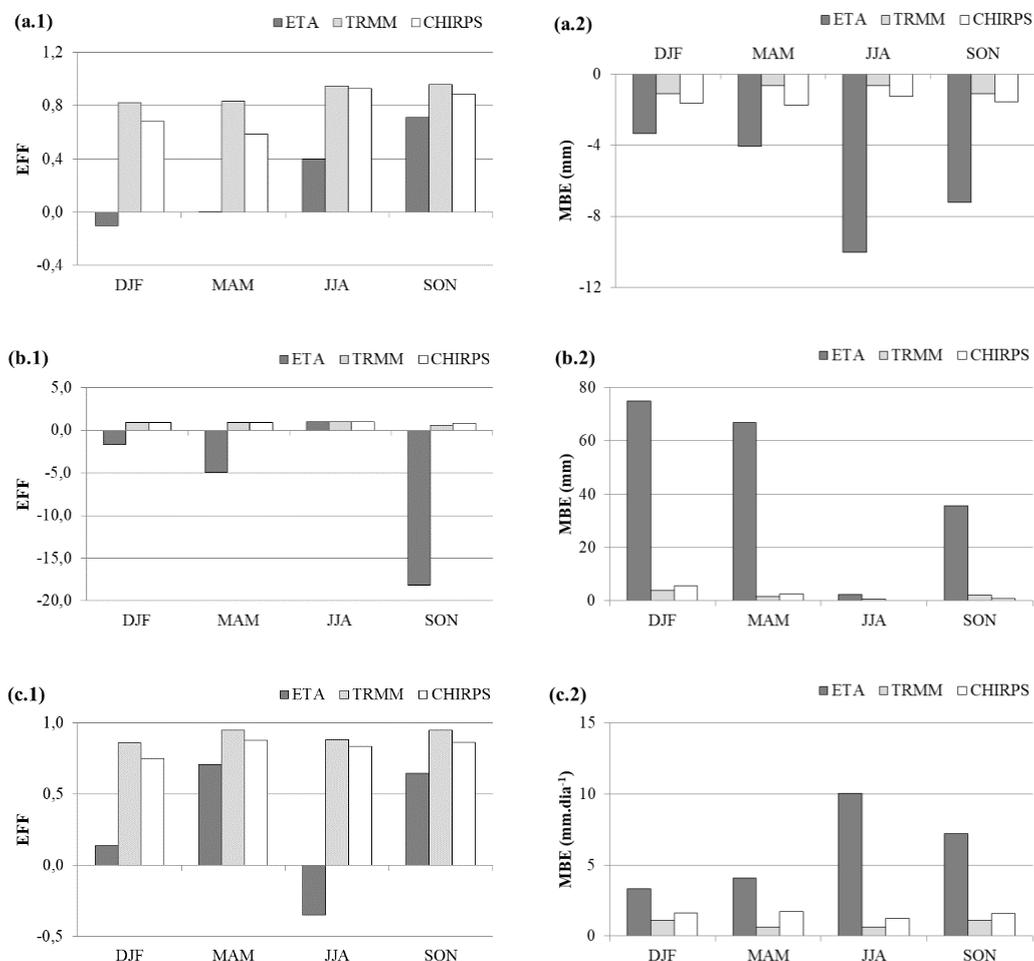
Dado	R	R²	EFF	MBE (mm.dia⁻¹)	RMSE (mm.dia⁻¹)	rRMSE (%)	PB (%)
ETA	0,92	0,84	0,76	6,15	10,80	24,72	14,06
TRMM	0,98	0,97	0,97	0,80	3,97	9,09	1,82
CHIRPS	0,97	0,94	0,93	1,56	5,87	13,44	3,57

Fonte: Autor.

Na análise do déficit/excedente hídricos e evapotranspiração real, pode-se notar que a superestimava da precipitação do ETA (**Figura 5.12**) no período seco (JJA) não são refletidas no excedente hídrico que apresentam altos valores de EFF e baixos MBE no período, entretanto, são refletidos no déficit hídrico que é subestimado e, conseqüentemente, na evapotranspiração real que é superestimada (MBE elevado) e com baixa concordância com dados INMET (EFF baixo). Verifica-se que os déficits hídricos nos outros períodos foram mascarados pela superestimava da precipitação, o que resultou em alto erro na estimativa de EXC e ETR_{ETA} superior a ETR_{INMET} .

Ainda de acordo com a **Figura 5.12**, a alta concordância entre as estimativas TRMM e CHIRPS com as estimativas INMET é mantida nos quatro períodos analisados (DJF, SON, JJA e MAM). Entretanto, o melhor desempenho é observado na simulação do BH com os dados TRMM, caracterizados pelos elevados EFF e baixos valores de MBE para DEF_{TRMM} , EXC_{TRMM} e ETR_{TRMM} nos períodos.

Figura 5.12 Análise estatística: (1) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (EFF) e (2) Média dos erros (MBE) por períodos (DJF, SON, JJA e MAM) determinados para (a) Déficit hídrico, (b) Excedente hídrico e (c) Evapotranspiração real.



Fonte: Autor.

Alguns modelos de produtividade relacionam a deficiência de água, dada pela relação entre evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima, ao rendimento final da cultura em campo (por exemplo, DOORENBOS, KASSAM, 1979; PICINI et al., 1999). Como a ETr estimada pelos dados ETA, TRMM e CHIRPS são superestimadas em relação aos dados de estação, podem superestimar as estimativas de produtividade. As influências dessas características devem ser avaliadas na estimativa de produtividade

final da cultura para melhor parametrização e adequação do modelo às realidades de campo.

5.2 Uso do NDVI/MODIS para estimar a produtividade do café na fazenda Conquista

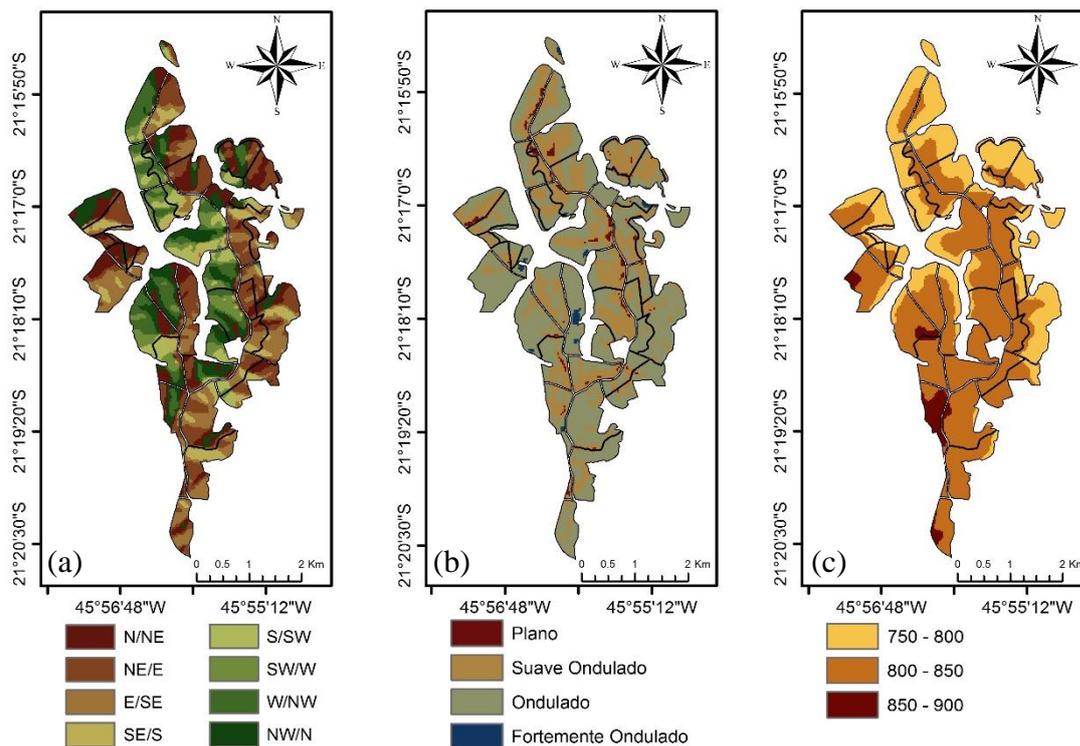
Por ser uma área majoritariamente irrigada, considerou-se que as necessidades hídricas da cultura foram atendidas, portanto, a produtividade real (Y_R) iguala-se a somatória da produtividade potencial (Y_P). Dessa maneira, a produtividade estimada dependeu somente das variáveis radiação, temperatura e do NDVI.

5.2.1 Caracterização do meio físico das áreas cafeeiras

É imprescindível ao bom funcionamento dos sistemas produtivos conhecer as características tanto da cultura quanto do ambiente onde ela está implantada. Na **Figura 5.13** são mostrados os mapas temáticos das variações altimétricas, de declividade e de orientação de vertentes das áreas cafeeiras da Fazenda Conquista elaborados a partir das imagens adquiridas do projeto TOPODATA.

Na **Figura 5.14** é mostrada a distribuição das lavouras cafeeiras em relação às classes de orientação de vertente, altitude e declividade. Em relação à altitude, observou-se que a área de estudo apresenta altitudes que varia de 750 a 900 metros. Verificou-se que 36,4% das lavouras cafeeiras localizam-se em altitudes entre 750 a 800m, a classe de 800 a 850m contém 60% das lavouras e áreas cuja altitude é superior à 850m contém apenas 3,56% da cafeicultura. Sedyama et al. (2001) salientam que as altitudes mais adequadas para o plantio de café arábica variam de 500m a 1200m. Vaast et al. (2006) comentam que em altitudes mais elevadas as temperaturas são menores, o que pode retardar o processo de amadurecimento do café e, conseqüentemente, levar ao maior acúmulo de bioquímicos associados à melhora do aroma do café e aumento da qualidade da bebida. Destaca-se, portanto, que o cultivo está distribuído em áreas adequadas ao plantio.

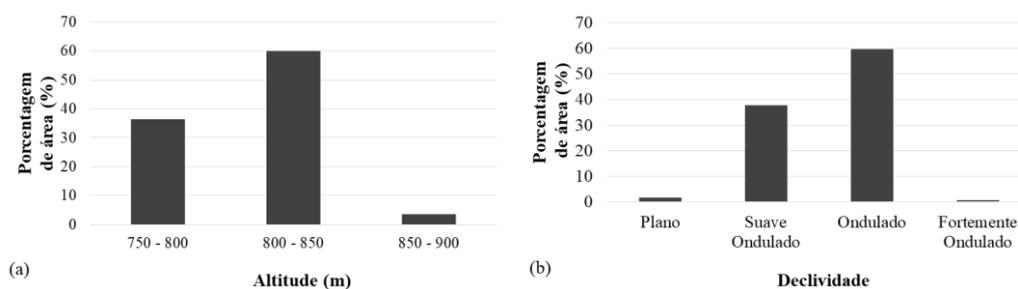
Figura 5.13 Mapas de (a) orientação de vertente, (b) declividade e (c) altitude (m) da fazenda Conquista.



Fonte: Autor.

Quanto às classes de declividade³, 59,7% estão localizados em relevo ondulado (8% a 20%) e 37,8% localizam-se em relevo suave ondulado (3% a 8%), enquanto 1,7% e 0,8% das lavouras encontram-se em terrenos plano (0% a 3%) e fortemente ondulado (20% a 45%), respectivamente.

Figura 5.14 Porcentagem das lavouras cafeeiras segundo as classes de altitude (a) e declividade (b) na Fazenda Ipanema.

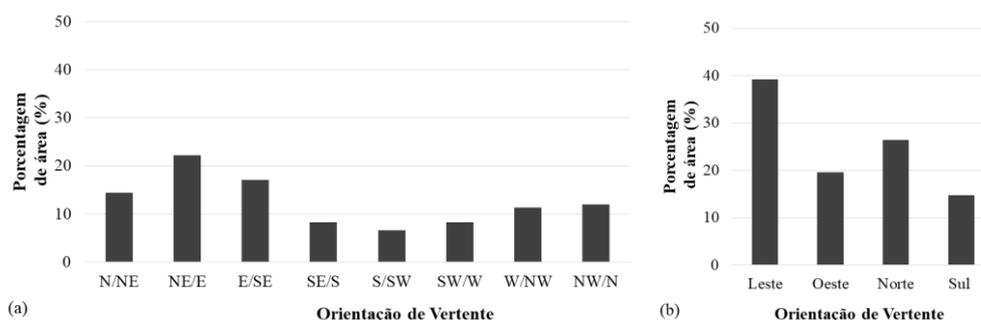


Fonte: Autor.

³ Agrupados classes de acordo com as recomendações da Embrapa (2009)

A **Figura 5.15** ilustra a proporção da distribuição das lavouras com relação à orientação de vertente. Os dados de orientação de vertentes foram dispostos em 8 classes, nos seguintes intervalos: **N/NE**: 0° a 45°; **NE/E**: 45° a 90°; **E/SE**: 90° a 135°; **SE/S**: 135° a 180°; **S/SW**: 180° a 225°; **SW/W**: 225° a 270°; **W/NW**: 270° a 315°; **NW/N**: 315° a 360°. Observa-se 39,2% das lavouras estão localizadas nas vertentes orientadas à Leste (NE/E e E/SE), 19,6% à Oeste (SW/W e W/NW) e as vertentes orientadas à Norte (N/NE e NW/N) e Sul (SE/S e S/SW), compreendem, respectivamente, 26,4% e 14,8% das áreas cafeeiras. A menor proporção da lavoura na face Sul pode estar relacionada, como sugere Sediya et al. (2001), a maior ocorrência de ventos frios moderados e fortes, que podem ocasionar “crestamento” foliar no período de inverno.

Figura 5.15 Porcentagem das lavouras cafeeiras segundo as classes de orientação de vertente na Fazenda Ipanema.



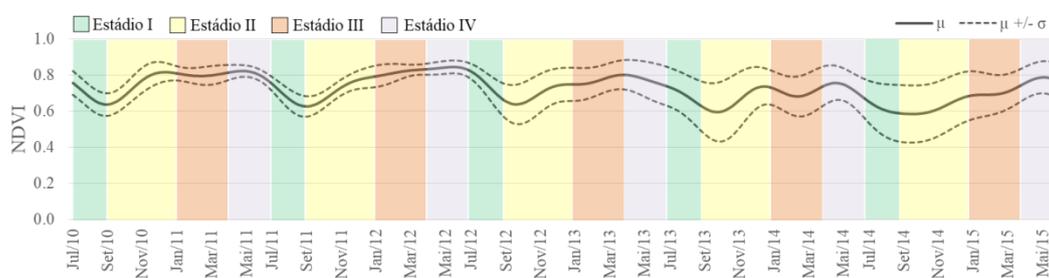
Fonte: Autor.

5.2.2 Análise temporal do índice de vegetação NDVI/MODIS e dos índices de área foliar da cultura cafeeira na fazenda Conquista

Na **Figura 5.16** é mostrado o perfil temporal dos valores médios do índice NDVI em áreas cafeeiras. Pode-se notar variação do NDVI principalmente em função das alterações ao longo do ciclo da cultura. De modo geral é possível notar que os valores do NDVI descresem no primeiro estágio, crescem no segundo estágio e permanece estável no terceiro e quarto estádios fenológicos. O aumento dos valores dos índices de vegetação no segundo estágio ocorre provavelmente em decorrência do aumento do número de folhas, enquanto os menores valores dos índices ocorrem nos períodos mais

secos quando há queda das folhas e no período final do ciclo cafeeiro quando ocorre senescência, colheita e auto poda do cafezal. Os comportamentos espectrais observados concordam com o estudo de Couto Jr. et al. (2013).

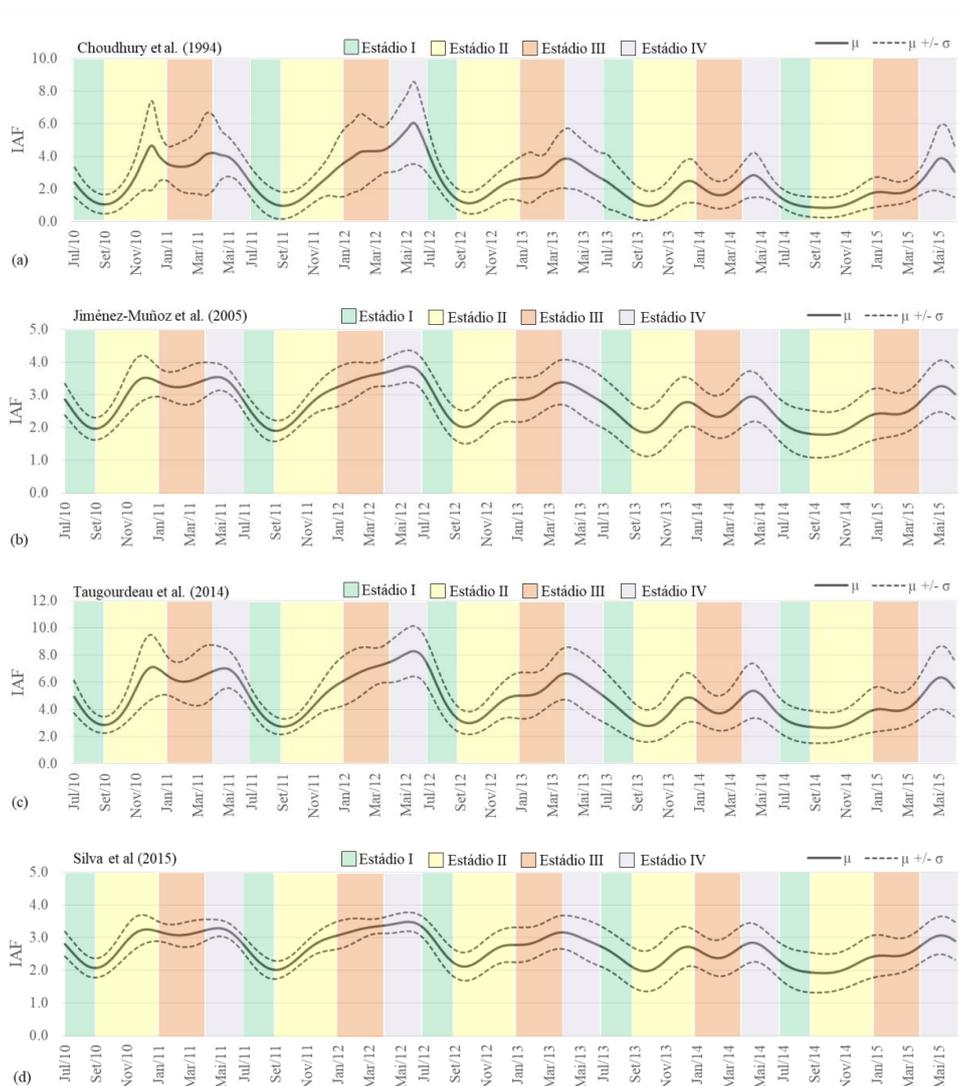
Figura 5.16 Variação temporal média do NDVI (μ) e desvio padrão (σ) ao longo do ciclo fenológico do café nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015. O ciclo fenológico compreende: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.



Como sugerem Epiphanyo et al. (1994) e Epiphanyo et al. (2010), a variação presente no comportamento da reflectância da cultura cafeeira pode estar relacionada aos sistemas de manejo da área tal como poda, bem como as características do cultivo cafeeiro como variedades, densidade, direcionamento e espaçamento das linhas de plantio e topografia, renovação de áreas e plantas em diferentes estádios fenológicos e idades, além das características associadas ao solo de fundo. Nesse caso a grande variabilidade dos índices nos anos 2012/13, 2013/14 e 2014/15 pode estar associada tanto à renovação do cafezal e à presença de talhões de cafezais em diferentes idades dentro de um mesmo pixel, quanto ao sistema denominado Safra Zero, no qual após a poda da lavoura pelo sistema de esqueletamento, o cultivo somente produzirá frutos após dois anos.

Os valores do IAF obtidos através dos modelos descritos na **Tabela 4.6** apresentaram comportamento similar ao apresentado pelo NDVI (**Figura 5.17**).

Figura 5.17 Variação temporal média do Índice de Área foliar (μ) e desvio padrão (σ) ao longo do ciclo fenológico do café nos anos safra de 2010/11 a 2014/15 dos modelo (a) Choudhury et al. (1994), (b) Jiménez-Muñoz et al. (2005), (c) Taugourdeau et al. (2014) e (d) Silva et al. (2015). O ciclo fenológico compreende as fases de repouso (Estádio I), floração e chumbinho (Estádio II), granação (Estádio III) e maturação (Estádio IV).



Fonte: Autor.

Observa-se que os modelos de Choudhury et al. (1994), Jiménez-Muñoz et al. (2005) e Silva et al. (2015) apresentam valores de IAF inferiores àqueles encontrados em literatura, com IAF médios inferiores a 4. Nota-se que a magnitude do IAF é maior no

modelo de Taugourdeau et al. (2014) que, com IAF médio de 6, apresenta resultados mais condizente com Valência (1974) e Arcila-Pulgarín and Chaves-Córdoba (1995). No modelo agrometeorológico-espectral (**item 4.5**) valores menores de IAF resultaram em valores menores de F_{cc} e conseqüentemente exigirão coeficientes de parametrização distintos para que os melhores resultados sejam alcançados, nesse caso resultaram em maiores valores do fator F_{pa} .

A análise estatística ANOVA apresentou valor-p $\ll 0,5$ ($p = 6,31 * E^{-68}$) evidenciando que ao menos um método para determinação do IAF se diferencia dos demais métodos testados. O teste de Tukey apresentou valor-p significativo (valor-p $\ll 0$), ou seja, há diferença apenas na comparação do modelo de Taugourdeau et al. (2014) com os demais, na comparação entre os outros três modelos o valor-p foi superior a 5%, indicando que os métodos de Choudhury et al. (1994), Jiménez-Muñoz et al. (2005) e Silva et al. (2015) não diferiram entre si.

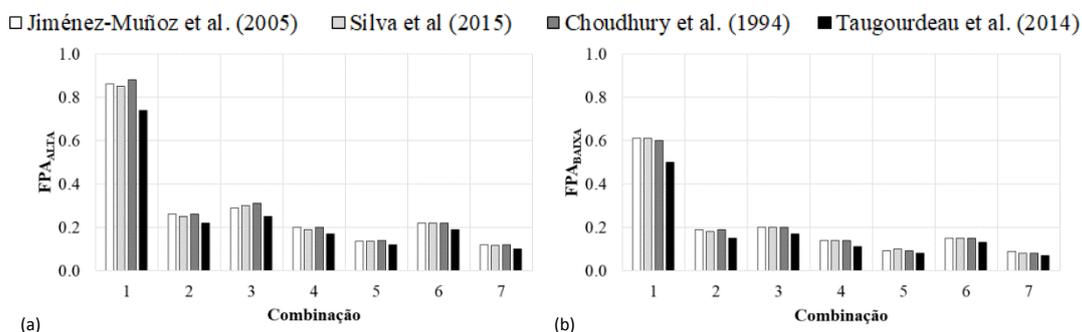
Segundo Dorigo et al. (2007) os modelos matemáticos são geralmente restritos às condições (ambientais e do cultivo) que prevaleceram durante o experimento, essa característica pode estar associada aos erros observados na determinação da variável IAF.

5.2.3 Avaliação dos valores de IAF nas estimativas da produtividade cafeeira

A análise do desempenho do IAF obtido por diferentes equações, conforme citados na **Tabela 4.8**, foi feita com base nos valores da estimativa de produtividade real e modelada do cafeeiro, através dos modelos agrometeorológico-espectrais baseados em Doorenbos e Kassam (1979) e do modelo baseado em Picini (1998).

No modelo derivado de Doorenbos e Kassam (1979), em função da bienalidade cafeeira, a parametrização do modelo foi feita com valores diferentes para os anos de baixa (F_{paB}) e de alta produtividade (F_{paA}). Os valores que permitiram a melhor parametrização e, conseqüentemente, melhor ajuste do modelo para cada combinação das fases fenológicas (**Figura 4.7**) são mostrados na **Figura 5.18**.

Figura 5.18 Fator de produtividade agrícola para os anos de alta (a) e baixa (b) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafejeiras utilizando modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979).



Fonte: Autor.

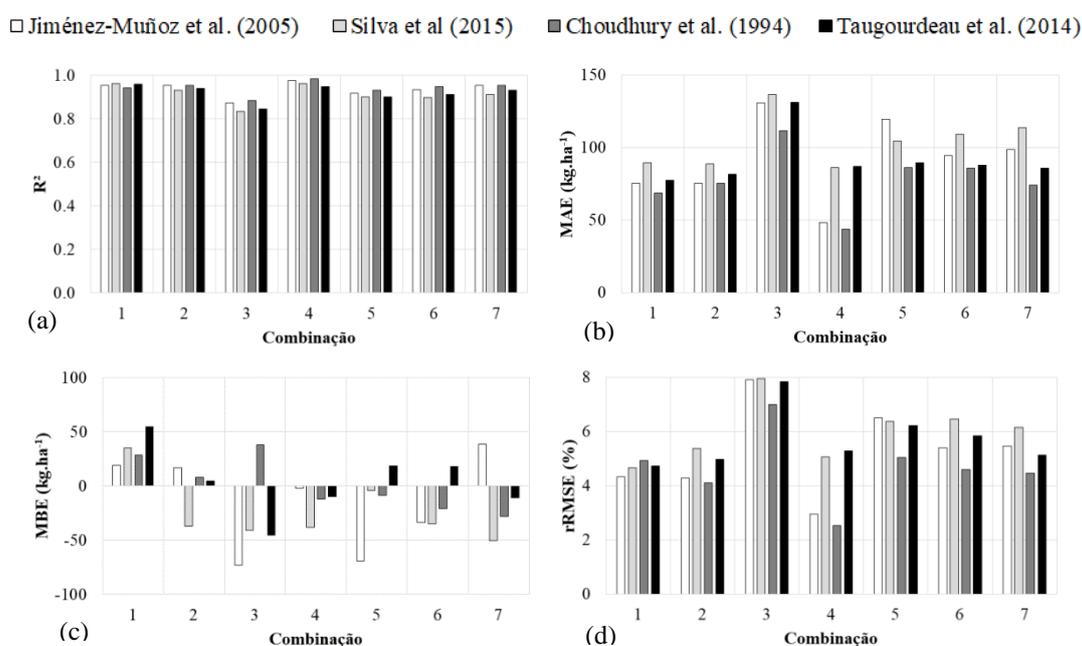
Os coeficientes de determinação (R^2) e os erros MAE, MBE e rRMSE obtidos da relação entre a produtividade de campo fornecida por técnicos da fazenda Conquista e produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) são mostrados na **Figura 5.19**, enquanto os mesmos erros associados as estimativas feitas pelo modelo baseado em Picini (1998) são mostrados na **Figura 5.21**.

Ao analisar os resultados contidos nas **Figuras 5.18** e **5.19**, observa-se que de maneira geral as produtividades estimadas com os IAFs obtidos pelos diferentes métodos apresentaram alta correlação com as produtividades observadas em campo, o que é evidenciada pelos elevados valores de R^2 e baixos valores de MAE e rRMSE.

No uso da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005), constatou-se que todas as combinações dos períodos fenológicos apresentaram alta correlação com a produtividade cafejeira, com R^2 superior a 0,85. Ao analisar os erros MAE e rRMSE, verifica-se que os menores valores foram encontrados na combinação 4 ($R^2 = 0,98$) que corresponde ao estágio de dormência das gemas florais, passando pela fase de floração, até o início de formação dos grãos, no qual foram encontrados valores de MAE de 48,37 kg.ha⁻¹ e rRMSE de 2,95%, ou seja, o modelo apresentou diferença de 2,95% em relação aos valores observados em campo. O MBE negativo indicou que o modelo

subestimou a produtividade em relação aos dados reais. Ainda para combinação 4, observou-se que no ano de alta produtividade 20% ($FPA_A = 0,20$) da matéria seca corresponde ao grão, enquanto no ano de baixa produtividade 14% ($FPA_B = 0,14$) representa a matéria seca de interesse econômico (**Figura 5.18**).

Figura 5.19 Os coeficientes de determinação (R^2) (a) e os erros MAE (b), MBE (c) e rRMSE (d) obtidos da relação entre produtividade real obtida em campo e a produtividade modelada com uso do modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras.



Fonte: Autor.

A incorporação da equação de Silva et al. (2015) no modelo de produtividade apresentou melhores correlações com a produtividade observada em campo nas combinações 1 e 4, em ambas com R^2 de 0,96. Com a utilização da combinação 1, o modelo apresentou superestimativa em relação a produtividade de campo ($MBE > 0$) com diferença percentual de 4,7% entre a produtividade estimada e medida, nesse caso o MAE foi de 93,53 $kg \cdot ha^{-1}$. A combinação 4 apresentou erros superiores aos observados na combinação 1, com MAE de 101,61 $kg \cdot ha^{-1}$ e rRMSE de 5,06%. O melhor ajuste do modelo na combinação 1 foi encontrado com $FPA_A = 0,85$ e $FPA_B = 0,61$, enquanto na

combinação 4 o melhor ajuste se deu com valores de $FPA_A = 0,19$ e $FPA_B = 0,14$ (**Figura 5.18**).

No emprego da equação de Choudhury et al. (1994), assim como no uso de Jiménez-Muñoz et al. (2005), a combinação 4 apresentou melhor valor de R^2 e menores erros quando comparado as outras combinações testadas e também subestimou a produtividade. Com um R^2 de 0,98, a produtividade modelada apresentou MAE de $43,59 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e rRMSE de 2,53% em relação a produtividade real. Nesse caso, os valores de FPA para parametrização do modelo foi de $FPA_A = 0,20$ e $FPA_B = 0,14$ (**Figura 5.18**), para os anos de alta e baixa produtividade, respectivamente. No entanto, uma desvantagem no emprego da equação de Choudhury et al. (1994), é a necessidade de valores máximos e mínimos de NDVI, no qual são necessárias análises temporais para que os valores mínimos não sejam aqueles de solo exposto e os valores máximos não sejam erros de medição do sensor por exemplo, o que influenciaria as análises referentes ao desenvolvimento da cultura.

A equação de Taugourdeau et al. (2014), assim como ocorre na incorporação da equação de Silva et al. (2015), apresentou as melhores correlações nas combinações 1 e 4, com R^2 de 0,96 e 0,95, respectivamente. Nota-se que os erros apresentados pela combinação 1 (MAE = $77,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, MBE = $54,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e rRMSE = 4,74%) são menores do que os encontrados na combinação 4 (MAE = $87,03 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, MBE = $-9,97 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e rRMSE = 5,28%). Na combinação 1 a parametrização foi feita com $FPA_A = 0,74$ e $FPA_B = 0,5$, já na combinação 4 a parametrização foi feita com $FPA_A = 0,17$ e $FPA_B = 0,11$ (**Figura 5.18**).

Para os valores de IAF obtidos pelas quatro equações o pior desempenho da modelagem foi observado na fase 3 (**Figura 4.6**) que correspondeu ao estágio de formação dos grãos e início de maturação, o que é comprovado pelos menores valores de R^2 (0,83 a 0,88) e erros MAE ($111 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $137 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e rRMSE (7,01% a 7,96%) mais elevados do que aqueles encontrados nas outras combinações. A análise estatística ANOVA entre as produtividades agrícolas modeladas pelo método baseado em Doorenbos e Kassam (1979) apresentou valor-p $\gg 5\%$ ($p \approx 1$), o que indica que as produtividades estimadas

pela incorporação dos diferentes IAFs e diferentes combinações não diferem estatisticamente entre si.

Na **Tabela 5.6** é mostrada a diferença encontrada entre a estimativa de produtividade cafeeira modelada com a incorporação da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4 e a produtividade real obtida em campo. Observa-se que os valores das estimativas da produtividade modelada são próximos aos valores reais, com uma diferença relativa mínima de 0,1% na safra 2010/11 e máximo de 5% em 2014/15. Nota-se que os maiores erros ocorreram nos períodos de maior variabilidade dos índices de vegetação, indicando a influência do índice na estimativa de produtividade.

Observou-se que dentro da resolução espacial de 250m (6,25 ha) do pixel MODIS houve talhões de café com diferentes idades e cultivares, submetido a sistemas de poda e talhões cuja cultura estava sendo renovada. Todas essas características, próprias do cultivo e da área de produção, interferem na reflectância do alvo e consequentemente, no IAF e na estimativa de produtividade.

Tabela 5.6 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) com o IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4.

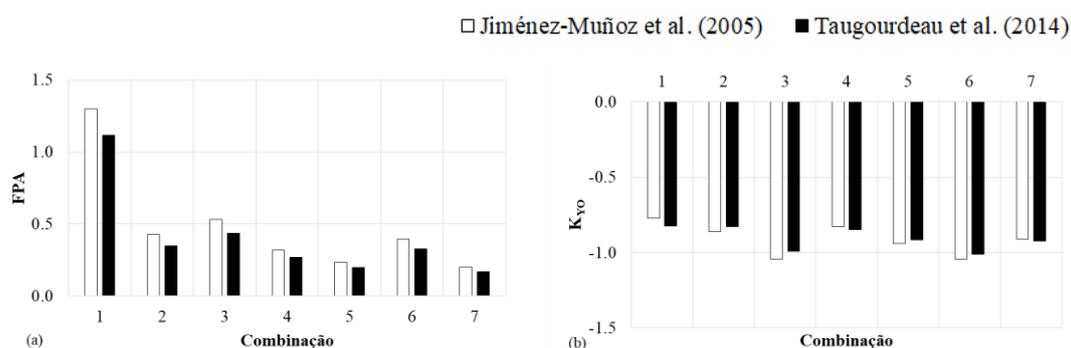
Ano – Safra	Produtividade Fazenda (kg.ha ⁻¹)	Produtividade Modelada (kg.ha ⁻¹)	Diferença (kg.ha ⁻¹)	Diferença Relativa (%)
2010/11	2514,9	2513,6	-1,3	-0,1
2011/12	1658,9	1677,3	18,4	1,1
2012/13	2378,9	2311,8	-67,1	-2,8
2013/14	1569,5	1510,9	-58,6	-3,7
2014/15	1913,7	2010,1	96,4	5,0

Fonte: Autor.

Os valores de fator de produtividade agrícola (F_{PA}) e o coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior (k_{y_0}) que permitiram a melhor parametrização do modelo baseado em Picini (1998) são mostrados na **Figura 5.20**. Nessa etapa foram

feitos testes apenas com os IAF estimados através das equações de Jiménez-Muñoz et al. (2005) e Taugourdeau et al. (2014).

Figura 5.20 Fator de produtividade agrícola (F_{PA}) e o coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior (k_{y_0}) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafeeiras utilizando modelo agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998).

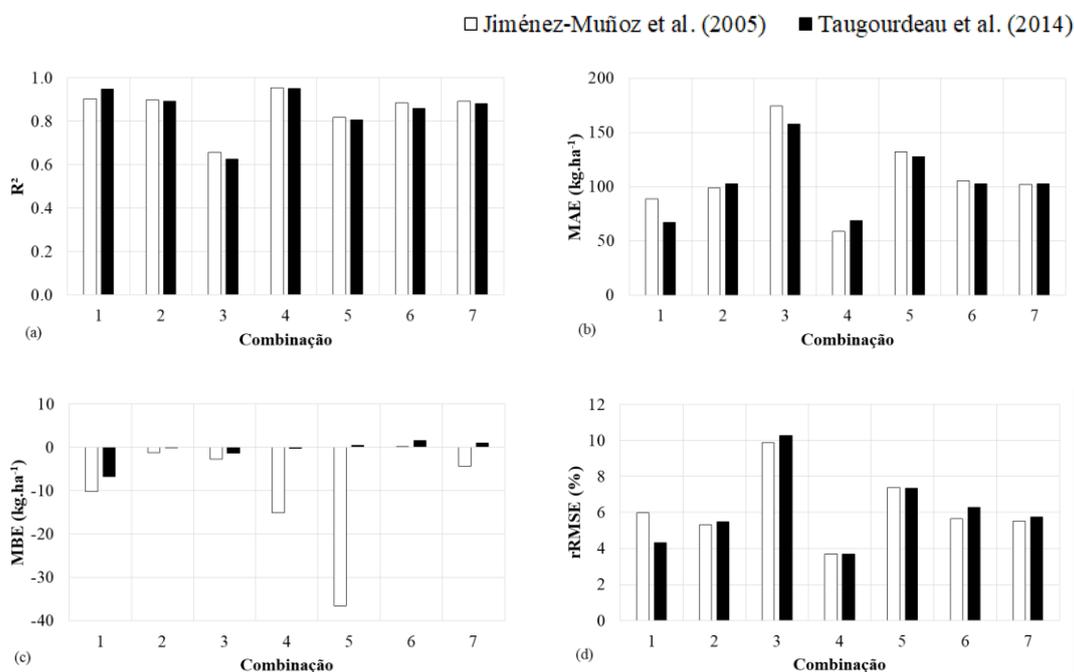


Fonte: Autor.

Na **Figura 5.21** nota-se similaridade da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998) tanto na utilização da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) quanto no uso da equação de Taugourdeau et al. (2014), com valores de R^2 elevados e baixos valores de rRMSE para todas as combinações com exceção da combinação 3. A análise estatística ANOVA indicou que não há diferença significativa entre as produtividades agrícolas modeladas ($p \approx 1$).

A utilização da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) apresentou R^2 variando entre 0,66 (Combinação 3) e 0,95 (Combinação 4) e rRMSE entre 3,68% (Combinação 4) e 9,86% (Combinação 3). Apesar da boa relação entre as produtividades modeladas e de campo, notou-se que de maneira geral o modelo tendeu a subestimar a produtividade ($MBE < 0$). Assim, como ocorreu com modelagem agrometeorológica-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979), os melhores resultados foram obtidos com a combinação 4, com R^2 de 0,95, MAE de 58,8 kg.ha⁻¹ e rRMSE de 3,68% em relação a produtividade de campo. Na combinação 4 a parametrização foi feita com F_{PA} de 0,32 e k_{y_0} de -0,83, o que indica uma maior influência do fator k_{y_0} no modelo.

Figura 5.21 Os coeficientes de determinação (R^2) (a) e os erros MAE (b), MBE (c) e rRMSE (d) obtidos da relação entre produtividade real obtida em campo e a produtividade modelada pelo método agrometeorológico-espectral baseado em Picini (1998) variando-se os índices de área foliar e as combinações das fases fenológicas cafejeiras.



Fonte: Autor.

A utilização da equação de Taugourdeau et al. (2014) no modelo agrometeorológico-espectral baseado em Picini (1998), assim como o anterior, apresentou melhor resultado com a combinação 4, no qual foram encontrados R^2 de 0,95 e MAE de 68,60 kg·ha⁻¹. Nesse caso, os valores de FPA e k_{yo} que melhor se relacionaram com a produtividade real foram de 0,27 e -0,85, respectivamente.

Nas **Tabelas 5.7** e **5.8** são apresentadas as diferenças entre as produtividades modeladas com agrometeorológico-espectral baseado em Picini (1998) e produtividades de campo para os anos safra 2011/12 a 2014/15, com a utilização das equações Jiménez-Muñoz et al. (2005) e Taugourdeau et al. (2014), respectivamente. Na **Tabela 5.7** pode-se notar que a diferença relativa entre a produtividade modelada e de campo variou entre 0%

(2014/15) e 5,8% (2013/14). Na **Tabela 5.8** as diferenças oscilam entre 2,4% (2012/13) a 5,2% (2013/14).

Tabela 5.7 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo método de Piccini (1998) com o IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4.

Ano – Safra	Produtividade Fazenda (kg.ha ⁻¹)	Produtividade Modelada (kg.ha ⁻¹)	Diferença (kg.ha ⁻¹)	Diferença Relativa (%)
2011/12	1658,9	1746,57	87,6	5,3
2012/13	2378,9	2321,90	-57,0	-2,4
2013/14	1569,5	1479,05	-90,5	-5,8
2014/15	1913,7	1913,47	-0,3	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 5.8 Estimativa de produtividade real versus produtividade modelada estimada pelo método agrometeorológico-espectral baseado em Piccini (1998) com o IAF obtido através da equação de Taugourdeau et al. (2014) para a combinação 4.

Ano – Safra	Produtividade Fazenda (kg.ha ⁻¹)	Produtividade Modelada (kg.ha ⁻¹)	Diferença (kg.ha ⁻¹)	Diferença Relativa (%)
2011/12	1658,9	1735,3	76,4	4,6
2012/13	2378,9	2322,6	-56,3	-2,4
2013/14	1569,5	1488,2	-81,4	-5,2
2014/15	1913,7	1974,1	60,4	3,2

Fonte: Autor.

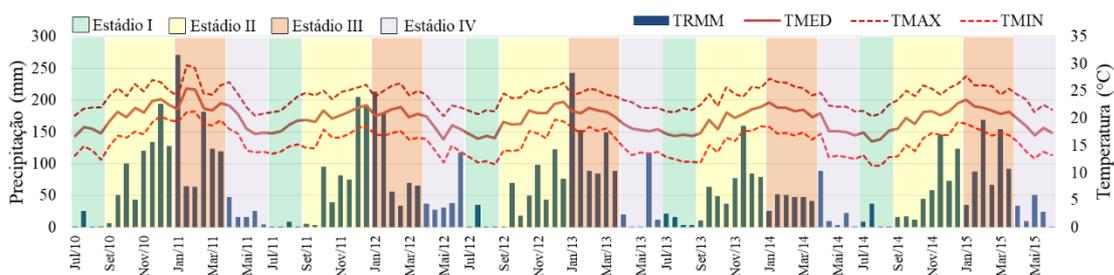
5.3 Monitoramento da cultura cafeeira na Região Sul/ Sudeste de Minas

5.3.1 Análise da variação inter e intra anual das variáveis meteorológicas e NDVI/MODIS

Os valores médios de temperatura (máxima, média e mínima), precipitação oriunda do produto TRMM, NDVI e fator de penalização para o período de julho de 2010 a junho de 2015 serão discutidos a seguir. De modo geral, as menores temperaturas e precipitações ocorreram nos estádios de dormência das gemas florais/início do florescimento (fase I) e estágio de florescimento/início de formação dos grãos (fase IV) do cafeeiro (**Figura 5.22**).

Os períodos de maior precipitação foram acompanhados pelas temperaturas mais elevadas nos meses de setembro a março, correspondentes os estádios de florescimento/início de formação dos grãos (fase II) e estágio de formação dos grãos/início de maturação (fase III). De acordo com Meireles et al. (2009), as chuvas do período de primavera/verão favorecem as fases de frutificação, formação de chumbinho e granação, enquanto os períodos secos do outono/inverno favorecem a maturação e a colheita.

Figura 5.22 Fases fenológicas do café em relação aos regimes pluviométricos e temperaturas (máxima, média e mínima do ar) na região Sul/Sudoeste de Minas nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.



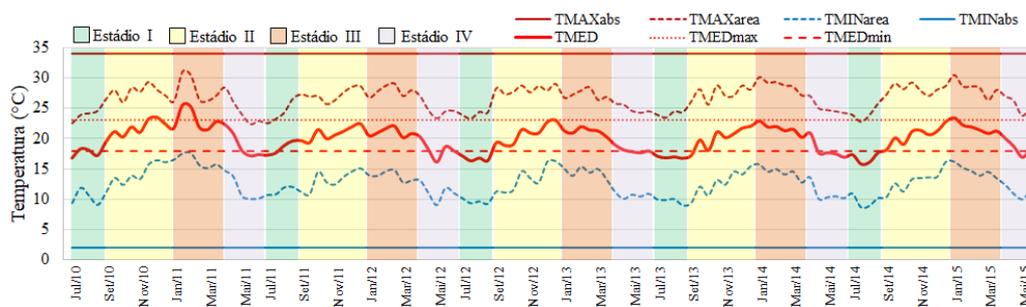
Fonte: Autor.

De acordo com a **Figura 5.22**, de modo geral, o período de menor precipitação foi observado de abril a agosto, que correspondeu aos estádios de dormência das gemas florais/início do florescimento (fases I) e maturação dos frutos (fase IV). Camargo e Carmargo (2001) salientam que o período seco entre julho e agosto favorece a florada mais uniforme. Segundo os mesmos autores, no período de abril a junho déficits hídricos favorecem a maturação e beneficiam a qualidade do produto.

A temperatura máxima média anual variou de 23,7 °C na safra 2012/2013 a 24,5°C na safra 2010/11 (**Figura 5.22**). As temperaturas máximas mais elevadas foram observadas em janeiro de 2010/11 (31,1°C) e as menos elevadas em maio do mesmo ano (22,3°C) (**Figura 5.23**). De acordo com os dados do ETA no período estudado não ocorreram temperaturas máximas superiores a 34°C na época de florescimento, o que segundo Sedyama et al. (2001) poderiam causar “estrelinhas”.

A temperatura mínima média variou de 11,2°C (2014/15) a 21,3 °C (2010/11) (**Figura 5.22**). O menor valor da temperatura mínima na área de estudo ocorreu em julho de 2014 (8,71°C) (**Figura 5.23**). Não foram observadas temperaturas absolutas inferiores a 2°C que segundo Camargo et al. (2003) seria a temperatura representativa de geadas e causaria redução da produtividade cafeeira. As tabelas com valores de temperatura por período de estudo encontram-se no **Apêndice E**.

Figura 5.23 Variações da temperatura (máxima, média e mínima) durante as fases fenológicas do café, para o período de jun/2010 a maio/2015.

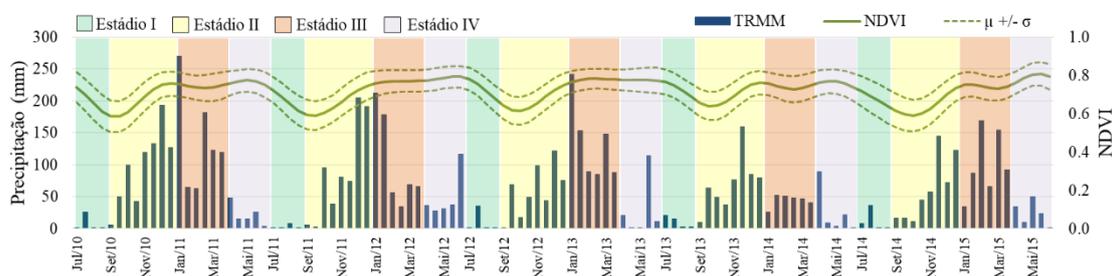


Fonte: Autor.

A **Figura 5.24** mostra a evolução temporal do índice de vegetação dos anos safra 2010/11 a 2014/15. Nota-se que houve incremento do IV juntamente com o período de

chuvas que pode estar associado ao aumento do número de folhas. Por outro lado, observou-se que houve queda do IV nos períodos secos (julho a setembro) no qual há a desfolha pela colheita e auto-poda do cafezal. Observou-se que o período de máximo $NDVI_{médio}$ ocorreu posteriormente ao período de chuvas. As regressões lineares simples entre a precipitação média e o $NDVI_{médio}$ indicam a maior relação entre o NDVI e precipitação com atraso de 2 meses ($R^2 = 34\%$). Os resultados corroboram com aqueles encontrados por Couto Jr. (2013) na análise do comportamento do NDVI sobre áreas cafeeiras.

Figura 5.24 Série temporal da precipitação média e NDVI médio e fases fenológicas do café no período de 2010/11 a 2014/15.



Fonte: Autor.

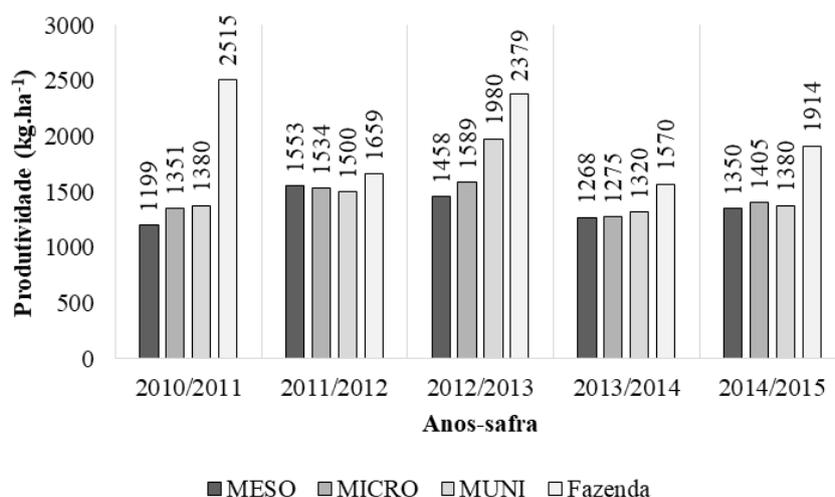
5.3.2 Análise das estimativas de produtividade do café com utilização de dados TRMM

A estimativa de produtividade foi feita com a utilização do IAF estimado a partir da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) abrangendo os estádios I, II e III, ou seja, o período que se estende da dormência das gemas florais/início do florescimento à formação dos grãos/início de maturação.

Observa-se pela **Figura 5.25** que segundo informações do IBGE não houve variação característica da bianalidade com amplitudes pronunciadas nos anos de 2010/11 a 2014/15 na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas Gerais. Segundo os relatórios de acompanhamento de safra da Conab, a bianalidade cafeeira na região Sul/Sudoeste de Minas Gerais vem diminuindo, em decorrência tanto da inversão da safra nos municípios, quanto de tratamentos culturais, manejo de safra zero e condições climáticas

desfavoráveis a cultura cafeeira. O mesmo comportamento pode ser verificado nas produtividades determinadas pelo IBGE na microrregião e no município de Alfenas utilizados nesse estudo. Entretanto, ao nível da fazenda Conquista utilizada nesse estudo verifica-se produtividade elevada e bienalidade acentuada, com grandes amplitudes entre os anos de baixa e alta produtividade agrícola. O ciclo bienal é um processo natural da planta do café e tem grande influência sobre a produtividade da cultura, portanto, deve ser considerada em modelos agrometeorológicos aplicados ao cafeeiro, uma vez que o ciclo bienal interfere sobre o efeito das condições meteorológicas (PICINI et al., 1999).

Figura 5.25 Produtividades anuais de café ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) para: Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas (MESO), Microrregião de Alfenas (MICRO), Município de Alfenas (MUNI) e fazenda da Conquista.



Fonte: Autor.

Segundo a Conab, as estimativas de 2010/11, 2012/13 e 2014/15 correspondem a bienalidade negativa, ou seja, quando há menor produção da planta, enquanto os anos 2011/12 e 2013/14 correspondem a bienalidade positiva. No entanto, verificou-se que na fazenda da Conquista houve inversão da safra de alta e baixa em relação a informação do órgão.

Na **Tabela 5.9** são mostradas as produtividades estimadas pelo IBGE (referência) e as produtividades obtidas pelo modelo agrometeorológico-espectral baseado em Doorenbos e Kassam (1979) para os anos de 2010/11 a 2014/15 na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas. O fator de produtividade agrícola (FPA) de 0,078 foi o valor que possibilitou a melhor relação entre a produtividade real e a produtividade modelada.

Tabela 5.9 Produtividade média e diferença relativa entre a produtividade estimada pelo IBGE e a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para região Sul/Sudoeste de Minas Gerais.

Ano-Safra	Mesorregião Sul/Sudeste de Minas				
	IBGE	MOD	Diferença		
	kg.ha ⁻¹	kg.ha ⁻¹	kg.ha ⁻¹	%	Saca.ha ⁻¹
2010/11	1199	1416,0	217,0	18,1	3,6
2011/12	1553	1367,3	-185,7	-12,0	-3,1
2012/13	1458	1349,8	-108,2	-7,4	-1,8
2013/14	1268	1399,0	131,0	10,3	2,2
2014/15	1350	1278,4	-71,6	-5,3	-1,2

Fonte: Autor.

A partir da **Tabela 5.9**, observa-se que no ano safra 2010/11 a diferença relativa foi de 217kg.ha⁻¹ (3,6 sacas.ha⁻¹), o que representou uma superestimativa da produtividade em 18%. Em relação a produtividade de referência, a produtividade modelada foi menor em 12% e 7,4% nos anos safra de 2011/12 e 2012/13, respectivamente. No ano agrícola de 2013/14, o modelo superestimou a produtividade em 10,3%, ou seja, diferença relativa de 131kg.ha⁻¹ em relação a produtividade de referência. A melhor relação foi observada no ano agrícola 2014/15, cuja diferença relativa foi de 5,3%. A análise estatística a partir do Teste t - *Student* ($\alpha = 5\%$) indicou que não houve diferença significativa entre as produtividades fornecidas pelo IBGE e as produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral.

Ao analisar os dados contidos na **Tabela 5.9** nota-se que os maiores erros entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a referência ocorreram nos anos safra 2010/11 e 2011/12. De acordo com as informações descritas

nos relatórios de acompanhamento de safra da Conab⁴ (2011), na safra de 2010/11, tanto o desenvolvimento vegetativo quanto o desenvolvimento produtivo da cultura foram beneficiados pelas condições climáticas adequadas ao desenvolvimento da cultura. No entanto, houve diminuição da produtividade esperada em decorrência do veranico prolongado nos meses de janeiro/11 e fevereiro/11. A modelagem, entretanto, não refletiu o possível estresse hídrico associado ao veranico descrito no relatório.

No ano safra 2011/12, segundo informações do mesmo órgão (CONAB, 2012), a produtividade foi favorecida tanto pelas condições climáticas favoráveis quanto pelo incremento de tratos culturais incentivados pela recuperação dos preços do café. O sistema de manejo agrícola adotado dentro das áreas cultivadas inclui as cultivares utilizadas, a distribuição dessa cultura em campo (arranjo espacial), sistema de sequeiro ou irrigado, utilização de insumos, etc. (HANSEN; JONES, 2000). Essas informações geralmente não são fornecidas nem mesmo associadas à modelagem, considerando-se, portanto, uniformização dos sistemas dentro da região, fator que influencia diretamente a produtividade modelada. Conforme salientam Hansen e Jones (2000), as informações sobre a heterogeneidade espacial do manejo podem contribuir para modelagem.

No ano safra 2012/13, segundo as informações da Conab (2013), as chuvas que se iniciaram de maio (início da colheita) e ocorreram de forma esparsa ao longo dos meses, provocaram derrubadas e fermentação dos frutos. Na modelagem agrometeorológica-espectral utilizada nesse estudo o excedente hídrico não é refletido em penalização da produtividade potencial da cultura, nesse caso, considera-se apenas que as necessidades hídricas foram atendidas, além disso, não foram considerados na modelagem os efeitos associados a época de colheita. Deve-se ater ao fato da produtividade modelada ser menor do que aquela estimada pelo IBGE. De acordo com o modelo, a produtividade

⁴ Feitos pela CONAB em parceria com a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA/IEA/SP), a Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI/SP), o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper/ES); a Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola S/A (EBDA/BA), a Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB) Departamento de Economia Rural (Deral/PR), a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Rondônia (Emater/RO) e técnico dos escritórios do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

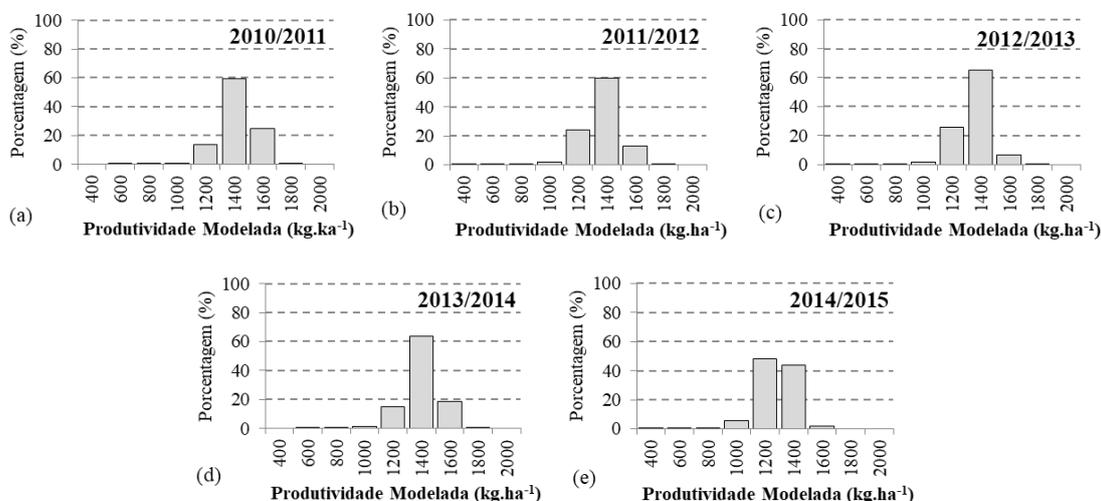
potencial foi penalizada pelo déficit hídrico ocorrido no estágio II (florescimento/início de formação dos grãos) nos meses de setembro/12 a janeiro/13.

Ainda segundo as informações publicadas pela Conab (2014), no ano safra 2013/14 além da estiagem e altas temperaturas que resultaram em carga produtiva menor, maior desfolha, estresse, problemas com broca e, inclusive, com ferrugem tardia contribuíram para queda da produção em relação aos anos anteriores. De acordo com as informações da Conab (2015), na safra de 2014/15 a queda de produtividade é atribuída a redução da área de produção causada pelas podas para recuperação das lavouras e suavização da bienalidade cafeeira.

A **Figura 5.26** mostra a variação percentual da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral nos anos safra de 2010/11 a 2014/15. Ao observar os gráficos nota-se que no ano de 2010/2011 a produtividade estimada foi entre 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹ em 60% da área, 14% da área apresentou produtividade entre 1200 kg.ha⁻¹ e 1400 kg.ha⁻¹ e em 25 % da área a produtividade variou entre 1600 kg.ha⁻¹ e 1800 kg.ha⁻¹.

Em 2011/2012 a produtividade também variou entre 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹ em 60% da área, entretanto, houve aumento da produtividade entre 1200 kg.ha⁻¹ e 1400 kg.ha⁻¹ de 14% para 25% em relação ao ano anterior, enquanto a produtividade entre 1600 kg.ha⁻¹ e 1800 kg.ha⁻¹ apresentou diminuição de 25% para 13% em relação ao ano anterior.

Figura 5.26 Variação percentual da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral nos anos safra de (a) 2010/11, (b) 2011/12, (c) 2012/13, (d) 2013/14 e (e) 2014/15.



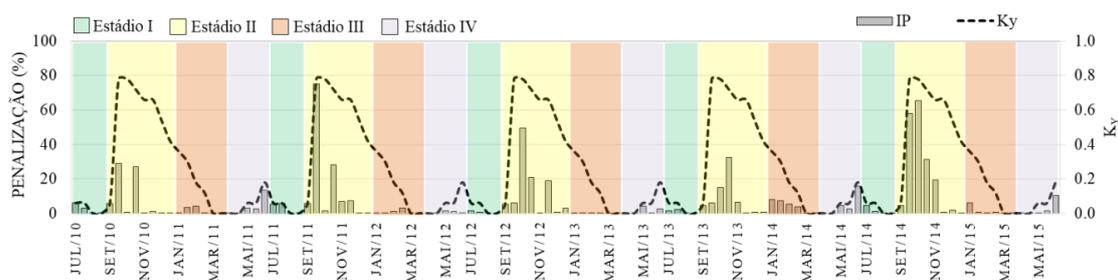
Fonte: Autor.

Ainda de acordo com a **Figura 5.26**, no ano 2012/13 a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral variou de 1400 kg.ha⁻¹ a 1600 kg.ha⁻¹ em 65% da área, de 1200 kg.ha⁻¹ a 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹ a 1800 kg.ha⁻¹ em 26% e 7% da área, respectivamente. Em 64% da área a produtividade variou entre 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹, enquanto 16% e 19% da área apresentaram produtividades entre 1200 kg.ha⁻¹ e 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹ e 1800 kg.ha⁻¹, respectivamente. No ano de 2014/15 (**Figura 5.26**) na maior parte da área a produtividade variou entre 1200 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹, em 48% a produtividade modelada variou entre 1200 kg.ha⁻¹ e 1400 kg.ha⁻¹ e em 44% a produtividade variou entre 1400 kg.ha⁻¹ e 1600 kg.ha⁻¹.

Na **Figura 5.27** são mostrados os valores do fator de resposta da produção (k_y) e o índice de penalização médio (IP) ocorrido na área de estudo no decorrer do período de estudo. As imagens para visualização da distribuição da penalização na área cafeeira estão disponíveis no **Apêndice F (Figuras F.4 a F.8)**. Ressalta-se que apesar dos fatores climáticos de temperatura mínima e máxima poderem afetar a produtividade cafeeira, na modelagem agrometeorológica-espectral a produtividade não sofre

penalização pelo efeito de temperatura. Desse modo, a penalização da produtividade potencial ficou restrita apenas ao déficit hídrico.

Figura 5.27 Valores do fator de resposta da produção (k_y) e índice de penalização parcial (IP) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura por período e fase fenológica cafeeira: Estádio I: dormência das gemas florais/início do florescimento; Estádio II: florescimento/início de formação dos grãos; Estádio III: formação dos grãos/início de maturação; Estádio IV: maturação dos frutos.



Fonte: Autor.

Nota-se que quanto maiores os valores de k_y e menores as relações entre ET_r/ET_m e maior será a penalização parcial a que a produtividade parcial estará sujeita (**Figura 5.27**). Portanto, quanto maior IP, maior a penalização parcial. De acordo os valores estimados de k_y , o cafeeiro é pouco prejudicado pelo estresse hídrico durante as fases de maturação e repouso, entretanto, nas fases de florada, chumbinho e expansão, o k_y elevado indica que a planta é prejudicada pelo déficit hídrico, ocasionando maior penalização da produtividade.

A dependência hídrica do cafeeiro diminui na fase de granação, chegando a valores nulos nos meses de março e abril, na transição entre a fase de grão em formação e para a fase de maturação. Além disso, verifica-se que o comportamento da penalização é coerente em relação àquele apresentado pela precipitação (**Figura 5.24**), ou seja, a penalização ocorre consecutivamente ao período de seca.

Verifica-se que para todos os anos analisados, a maior penalização da produtividade no estádio II (florescimento/início de formação dos grãos), com período mais prolongado e

de maior penalização da produtividade por estresse hídrico no ano safra 2014/15. Observou-se que o ano 2010/11 foi o ano menos afetado pelo déficit hídrico (**Figura 5.27**), as maiores penalizações foram observadas em setembro/10 (29%) e outubro/10 (27%), com menores, além disso, foi observada penalização da produtividade na fase IV com maior valor no mês de junho/11 (14%) que compreende a fase de maturação e antecede o estágio I do próximo ano (2011/12).

Nos anos safra 2011/12 e 2012/13 penalizações elevadas foram observadas apenas no estágio II (**Figura 5.27**). Em 2011/2012 valores significativos de penalização ocorreram no período de setembro/11 (75%) e outubro/11 (29%), enquanto no ano safra 2012/13 a penalização ocorre na primeira e segunda quinzena de outubro/12 com penalização de 49% e 20%, respectivamente. Ainda no mesmo ano foi observada penalização no mês de novembro/12 (19%).

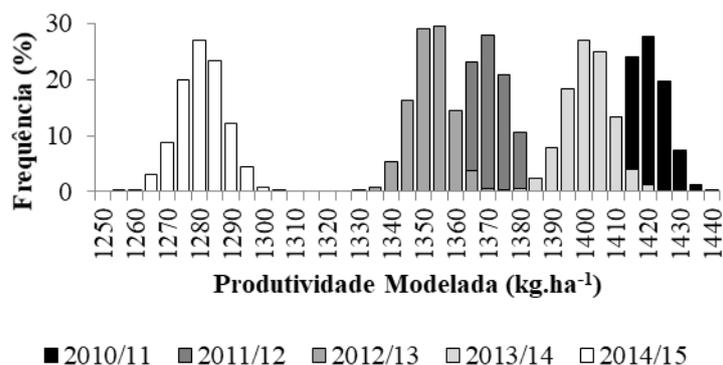
No ano safra de 2013/2014 a penalização foi distribuída pelos estádios II (florescimento/início de formação dos grãos) e III (formação dos grãos/início de maturação). Nesse ano as maiores penalizações foram registradas na primeira (15%) e na segunda (33%) quinzenas de outubro/13. Além disso, valores menores (em torno de 8%) foram registrados nos meses de janeiro/14 e fevereiro/14. O ano safra 2014/2015 apresentou um período longo de penalização durante o estágio II. As maiores penalizações por deficiência hídrica ocorreram no final de setembro/14 (58%), na primeira (66%) e segunda (32%) quinzena de outubro/14, e primeira quinzena de novembro/14 (19%).

Na **Figura 5.28** é descrito graficamente o comportamento da média das 2000 amostras aleatórias de tamanho 304 tomados dentro da população de pixels puros. A partir da amostragem foram calculadas também a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação da média, descritos na **Tabela 5.10**.

Como se pode observar, a distribuição da média dos dados converge a uma distribuição similar à distribuição Normal, além disso, verificou-se que os dados amostrados refletem a média da população descrita na **Tabela 5.9**. Da distribuição das médias tem-

se desvio padrão da média em torno de 7 e coeficiente de variação inferior a 0,6% (Tabela 5.10), indicando há homogeneidade na distribuição das amostras, com baixa variabilidade dos dados em relação à média.

Figura 5.28 Histograma da produtividade agrícola cafeeira estimada a partir de uma amostra (n = 304) de pixel puro na mesorregião de Sul/Sudoeste de Minas nos anos agrícolas de 2010/11 a 2014/15.



Fonte: Autor.

Tabela 5.10 Produtividade agrícola média, variância da média, desvio padrão da média e coeficiente de variação obtidos por amostragem aleatória simples (n = 304).

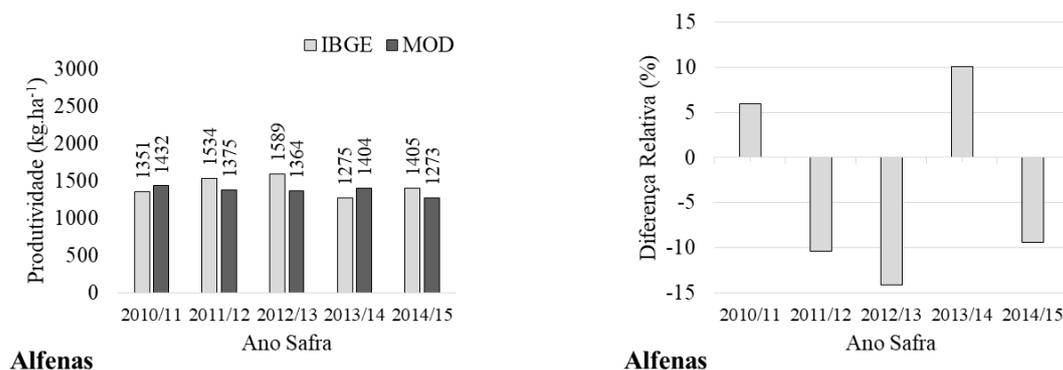
Estatísticas	Ano - Safra				
	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
Média (kg.ha ⁻¹)	1415,8	1367,1	1349,7	1398,8	1278,3
Variância	46,8	47,2	37,5	51,2	51,9
Desvio Padrão (kg.ha ⁻¹)	6,8	6,9	6,1	7,2	7,2
Coeficiente de variação	0,48%	0,50%	0,45%	0,51%	0,56%

Fonte: Autor.

5.3.3 Determinação da produtividade modelada do café para a microrregião e municípios

Na **Figura 5.29** é mostrada a produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e a diferença relativa (%) entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a produtividade fornecida pelo IBGE para a microrregião de Alfenas.

Figura 5.29 Produtividade modelada (MOD) e produtividade do IBGE para a microrregião de Alfenas nos anos safra de 2010/2011 a 2014/2015.



Fonte: Autor.

Nota-se que a produtividade modelada seguiu o padrão apresentado pela mesorregião com superestimativa da produtividade nos anos 2010/11 e 2013/14 e subestimativa da produtividade nos anos de 2011/12, 2012/13 e 2014/15. A diferença relativa entre a produtividade fornecida pelo IBGE e a produtividade modelada foram inferiores a 15%.

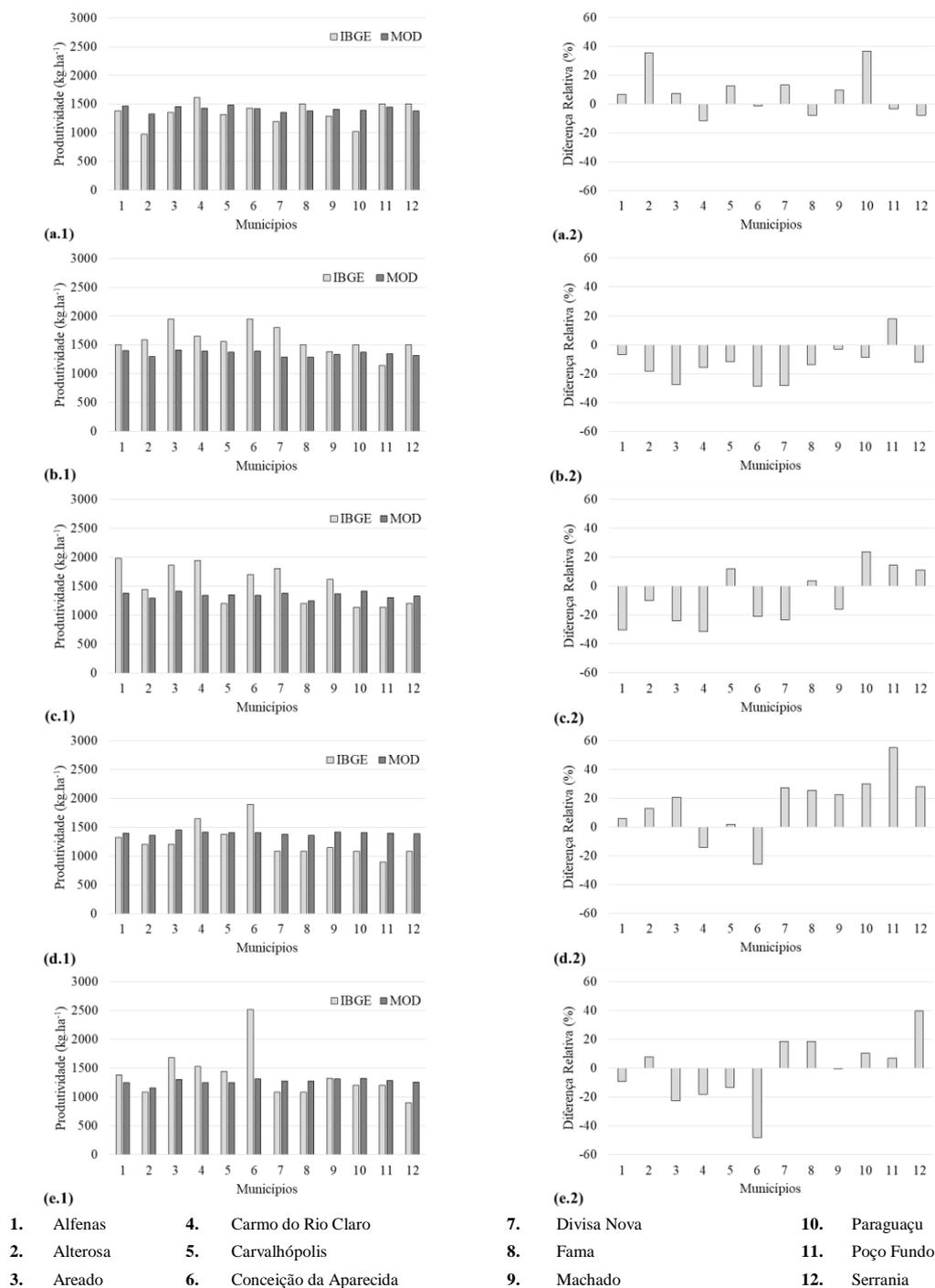
Na **Figura 5.30** apresentou-se a produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e a diferença relativa (%) entre a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral e a produtividade do IBGE para os municípios pertencentes à microrregião de Alfenas. A baixa variabilidade entre as produtividades dos municípios pode estar relacionada à baixa resolução e baixa variabilidade entre pixels dos valores meteorológicos utilizados na pesquisa. A análise estatística a partir do Teste t - *Student* ($\alpha = 5\%$) indicou que houve diferença significativa entre as produtividades fornecidas pelo IBGE e as produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral apenas no ano safra 2011/12. Para

os outros anos agrícolas as diferenças entre a produtividade modelada e os dados de referência não foram significativas.

Na análise da **Figura 5.30** observa-se que as diferenças relativas variaram entre 1,2% a 55,3%. Os resultados encontrados concordam com aqueles apresentados por Rosa (2010) no qual o erro associado às estimativas aumenta conforme a diminuição da área de estudo. De acordo com a autora, o modelo agrometeorológico-espectral mostrou-se satisfatório para obter a estimativa da produtividade do café em escala regional, entretanto, apresentou desempenho inferior em escala municipal. A autora atribui as diferenças à heterogeneidade acentuada em áreas menores, nesse caso as diferenças podem estar relacionadas à escala regional de calibração do modelo que não descreve as variações em escalas municipais das áreas cafeeiras ou subjetividade dos dados de referência.

Segundo Matiello (1986), a produção cafeeira é influenciada pelos fatores econômico, climáticos e de manejo da cultura. Os fatores econômicos representam os preços do café, custos de insumos e mão-de-obra, disponibilidade de crédito, entre outros que determinarão os investimentos nos tratamentos culturais. Em relação aos fatores climáticos destacam-se as geadas, secas e veranicos. Os tipos de solo, sistemas de cultivo, cultivar, espaçamento, combate às pragas e doenças, irrigação e proteção contra o vento caracterizam os fatores de manejo da cultura. Esses fatores intrínsecos ao cultivo diferem entre as localidades e não foram consideradas na modelagem agrometeorológica-espectral, e podem ter interferido na parametrização e, conseqüentemente, no desempenho do modelo.

Figura 5. 30 Estimativas de produtividade modelada (a esquerda – índice 1) e diferença relativa entre a produtividade modelada e a referência (a direita – índice 2) para os municípios pertencentes à microrregião de Alfenas nos anos safra (a) 2010/11; (b) 2011/12; (c) 2012/13; (d) 2013/14 e (e) 2014/15.



Fonte: Autor.

Além disso, são imprescindíveis ao desenvolvimento de modelos que utilizam dados de sensoriamento remoto que dados de campo confiáveis estejam disponíveis para que os modelos sejam ajustados corretamente e assim obter melhor desempenho no acompanhamento das safras agrícolas. Informações corretas da produtividade agrícola em campo são essenciais tanto na calibração quanto na validação do modelo, sendo, portanto, determinantes no bom desempenho da modelagem.

Como salienta Faivre et al. (2004), em termos de mudança de escala, todo o trabalho relativo à espacialização dos modelos de culturas diz respeito apenas aos dados, mas nunca ao modelo em si, entretanto, valores de entrada constantes para toda a área podem resultar em erros na modelagem. Um exemplo é o estudo de Yang et al. (2004) utilizando modelo de cultura (EPIC - *Erosion Productivity Impact Calculator*) com dados de sensoriamento remoto (LAI/MODIS) para estimar a produtividade de trigo de inverno no norte da China em que as diferenças entre as estatísticas reais e a modelagem municipal chegou a 34%. De acordo com os autores, nessas áreas as condições de irrigação e manejo são ótimas, entretanto, alguns parâmetros de entrada no modelo EPIC são constantes em todas as áreas, resultando em subestimativa da produtividade.

Faivre et al. (2004) e Oteng-Darko et al. (2013) ressaltam que na determinação da produtividade de culturas por meio de modelos deve-se considerar as diferenças de resoluções entre os dados de entrada, as saídas do modelo e as unidades espaciais (talhão, propriedade, município, estado, entre outros). Santos et al. (2005) notaram que o modelo modificado e parametrizado nos diferentes níveis hierárquicos de área apresentou melhores resultados e, conseqüentemente, maior potencial para estimar produtividades do cafeeiro.

5.4 Análise de sensibilidade do modelo agrometeorológico-espectral

Nessa etapa, atrelada a análise de sensibilidade do modelo de produtividade, fez a análise da provável influência do erro do dado ETA na estimativa de produtividade estimada através do modelo agrometeorológico-espectral no âmbito da mesorregião

Sul/Sudoeste de Minas. Salienta-se que apesar dos erros variarem espacialmente o estudo é baseado nos erros médios de radiação ($\pm 30\%$) e temperatura ($< 20\%$).

Na **Tabela 5.11** é apresentada os efeitos da mudança do dado de entrada de radiação de onda curta incidente, temperatura máxima e temperatura mínima nos valores de saída do modelo de produtividade.

Tabela 5.11 Sensibilidade do modelo aos dados de radiação de onda curta incidente (RAD), dados de temperatura máxima (TMAX) e temperatura mínima (TMIN)

Ano Agrícola	Variação (%)									
	Decremento RAD				Incremento TMAX			Decremento TMIN		
	-5%	-10%	-20%	-30%	+5%	+10%	+20%	-5%	-10%	-20%
2010/11	-2,1	-4,1	-8,3	-12,5	1,2	2,3	4,0	-1,0	-2,1	-4,6
2011/12	-2,0	-4,1	-8,2	-12,4	1,5	2,8	5,1	-1,1	-2,3	-4,8
2012/13	-1,7	-3,5	-7,2	-10,9	1,5	2,8	4,9	-1,1	-2,4	-5,1
2013/14	-1,8	-3,7	-7,4	-11,3	1,5	2,8	5,0	-1,1	-2,4	-5,2
2014/15	-1,9	-3,8	-7,6	-11,5	1,6	3,0	5,2	-1,1	-2,4	-5,1
Média	-1,9	-3,8	-7,7	-11,7	1,5	2,7	4,8	-1,1	-2,3	-5,0

Fonte: Autor.

Observa-se na informação contida na **Tabela 5.11** que o modelo é sensível às três variáveis de entrada testadas, em todos os casos houve aumento da variação da produtividade em relação ao dado de referência do ETA. Em relação a radiação, a variação da produtividade modelada em relação a referência foi entre -2,1% (decremento de 5%) a -12% (decremento de 30%), os decréscimos da radiação em 5%, 10%, 20% e 30%, resultaram em variação média de -1,9%, -3,8%, -7,7% e -11,7%, respectivamente.

A variação da produtividade em relação ao incremento da temperatura máxima houve aumento médio da produtividade no período de estudo em 1,5%, 2,7% e 4,8%, em relação aos incrementos de 5%, 10% e 20%, respectivamente. No caso da temperatura mínima, o decremento dos valores em 5%, 10% e 20% resultaram em diminuição da

produtividade média do período em -1,1%, -2,3% e -5% em relação a referência, respectivamente.

No caso das temperaturas máxima e mínima, nota-se que a sensibilidade do modelo é maior para temperatura máxima nas variações de 5 e 10%, entretanto, com a variação de 20% a sensibilidade à temperatura mínima é superior ao da temperatura máxima.

Os resultados são coerentes, pois a diminuição dos valores da radiação incidente implicaria em redução dos valores de ET_0 e conseqüentemente, melhor relação ETR/ETP e menor penalização da produtividade, entretanto, há diminuição da PMB (produção de matéria seca bruta do grupo da cultura), que causaria diminuição da produtividade modelada apesar a da diminuição da penalização. Comportamento similar é esperado com a diminuição da temperatura mínima, que resulta em decréscimo da temperatura média e conseqüentemente, diminuição da PMB e diminuição da penalização por estresse hídrico.

Com o acréscimo da temperatura máxima há aumento da temperatura média, seguido pelo aumento da ET_0 , diminuição da relação entre ETR/ETP e aumento da penalização da produtividade. Além disso, há aumento da PMB que, apesar do aumento da penalização por estresse hídrico, pode resultar em aumento da produtividade em relação à referência.

Segundo o teste Tukey há diferença significativa entre a produtividade de referência e a produtividade estimada com base no decremento e incremento das variáveis de entrada do modelo apenas para a estimativa baseada no decremento da radiação em 30%. O resultado sugere que erros associados à radiação podem impactar na determinação da produtividade modelada.

6. CONCLUSÕES

Nesse estudo o modelo agrometeorológico-espectral foi parametrizado e aplicado à cultura cafeeira em diferentes escalas espaciais: fazenda, municípios, micro e mesorregião. Esta pesquisa foi fundamentada em objetivos gerais e específicos, cujos resultados permitiram chegar as seguintes conclusões:

- As estimativas de temperatura (máxima, média e mínima) e de radiação do modelo ETA foram analisadas em relação aos dados de estação meteorológica do INMET. No período analisado, a temperatura mínima do modelo ETA superestimou as observações em aproximadamente 14%, enquanto os dados de temperatura média e máxima subestimaram as observações em 8,7% e 14%. O dado ETA representa o valor médio dentro da grade do modelo, o que pode resultar em erros quando comparados aos dados pontuais de estações meteorológicas. Com relação à radiação, houve superestimativa do dado ETA em relação aos dados de estação em 30% ($5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Nesse caso, o erro pode estar relacionado com a descrição incorreta dos parâmetros de nuvens no modelo. A análise de sensibilidade do modelo baseado em Doorenbos e Kassam em relação aos dados de temperatura e de radiação indicou que o modelo apesar de não ser sensível ao erro dos dados de temperatura ETA, foi sensível a erros associados a radiação de onda curta incidente. O erro igual ou superior a 30% pode afetar positivamente a estimativa de produtividade agrícola, ou seja, pode causar superestimativa da produtividade modelada em relação aos dados de campo.
- Em relação aos erros associados aos dados de precipitação ETA, TRMM e CHIRPS em relação aos dados de catorze estações meteorológicas do INMET, nota-se que comparado ao TRMM e ao CHIRPS, o modelo ETA apresentou menor desempenho para estimar a precipitação. A estimativa CHIRPS apresentou melhor desempenho nos primeiros 3 anos de estudo (2009 a 2011) em relação ao modelo TRMM e desempenho inferior nos anos posteriores (2012 a 2014). As estimativas ETA excederam 50% da quantidade de precipitação

coletadas pelo INMET ($rRMSE > 50\%$). Já os dados TRMM e CHIRPS apresentam $rRMSE < 50\%$ nos períodos DJF, MAM e SON, entretanto, em JJA as estimativas apresentam $rRMSE > 50\%$, sendo portanto, menos confiáveis nesse período.

- Em relação às estimativas de déficit hídrico verificou-se que todos os dados superestimaram a deficiência, entretanto, dados TRMM e CHIRPS apresentam comportamento similar àquele apresentado com os dados de estação do INMET. As estimativas realizadas com os dados ETA tenderam a ocultar períodos de deficiência hídrica e a superestimar períodos de excedente hídrico e de evapotranspiração real. Os resultados mostraram que a evapotranspiração real estimada com dados TRMM foram bem correlacionada com a evapotranspiração estimada com dados INMET. De modo geral, as estimativas apresentaram MAE e RMSE e MBE (viés) menores do que aqueles apresentados pelo ETA e CHIRPS durante o período de estudo. Além disso, foram maiores os coeficientes de correlação e de determinação do TRMM em relação às outras duas estimativas (ETA e CHIRPS). Os dados TRMM e CHIRPS foram eficientes na determinação das componentes DEF, EXC e ETR do balanço hídrico climatológico e mostram-se alternativa aos dados de precipitação provenientes de estação meteorológica, podendo ser utilizados como dado alternativo à falta daqueles provenientes de estações meteorológicas, auxiliando na tomada de decisão de atividades agrícolas.
- Na aplicação de modelagem de rendimento agrícola, pode-se inferir que as previsões do modelo ETA afetariam o desempenho do modelo, superestimando os resultados da modelagem. Dados TRMM e CHIRPS acompanham as variações da distribuição pluviométrica das estações meteorológicas e podem ser utilizados em modelagem agrícola, entretanto nos períodos de estiagem, os dados podendo mascarar períodos de déficit hídrico, podendo superestimar a produtividade estimada.

- A utilização de dados meteorológicos provenientes de modelo de reanálise e/ou provenientes de sensoriamento remoto mostram-se uma alternativa a ausência de dados de estações meteorológicas. Porém, salienta-se que, anteriormente a sua aplicação em modelagem de produtividade, são necessárias que esses dados sejam avaliados e validados para que os erros sejam conhecidos e sua influência sobre a produtividade modelada seja minimizada.
- Na determinação do índice de área foliar através de modelos estatísticos-empíricos, apenas a equação de Taugourdeau et al. (2014) apresentou resultados mais condizentes com a literatura, enquanto as estimativas feitas com a utilização das equações de Choudhury et al. (1994), Jiménez-Muñoz et al. (2005) e Silva et al. (2015) apresentaram valores de IAF inferiores àqueles encontrados em literatura. Entretanto, observou-se que o erro presente na determinação do IAF pode ser minimizado pela escolha do FPA, a variação das magnitudes de IAF causada por diferentes métodos de estimativas apenas exige parametrização distinta para que os melhores resultados sejam alcançados.
- Em relação à modelagem de produtividade utilizando dados MODIS, os modelos agrometeorológicos-espectrais baseados em Doorenbos e Kassam (1979) e do modelo baseado em Picini (1998) foram eficientes nas estimativas de produtividade em nível de fazenda. A incorporação do IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4 no modelo baseado em Doorenbos e Kassam (1979) apresentou menor erro em relação aos dados de campo, com diferenças relativas entre os dados modelados e dados de campo de -0,1%, 1,1%, -2,8%, -3,7% e 5% para os anos-safra 2010/11, 2011/12, 2012/13, 2013/14 e 2014/15, respectivamente. O modelo baseado em Picini (1998) com o IAF obtido através da equação de Jiménez-Muñoz et al. (2005) para a combinação 4 apresentou diferença relativa entre os dados modelados e de campo de 5,3%, -2,4%, -5,8% e 0,0% para os anos-safra de 2011/12, 2012/13, 2013/14 e 2014/15, respectivamente. Observou-se que para os modelos a diferença relativa foi inferior a 1,6 sacas.ha⁻¹. Notou-se que para a calibração

de ambos os modelos são necessárias séries históricas de dados de produtividade para ajuste das variáveis ky_0 e FPA. No modelo baseado em Doorenbos e Kassam (1979) são necessários valores diferentes de FPA para os anos de baixa (FPA_B) e anos de alta (FPA_A), enquanto no modelo baseado em Picini (1998), apenas um valor de FPA é necessário, ficando a cargo da produtividade do ano anterior descrever o comportamento de bienalidade cafeeira.

- Na aplicação do modelo baseado em Doorenbos e Kassam (1979) para a mesorregião Sul/Sudoeste de Minas a parametrização baseada apenas nas informações de produtividade da mesorregião cedida pelo IBGE não refletiu a bienalidade da área cafeeira o que afetou a distribuição dos valores da produtividade na área de estudo. Na estimativa da produtividade para os anos agrícolas 2010/11, 2011/12, 2012/13, 2013/14 e 2014/15 as diferenças relativas entre a produtividade modelada e o IBGE foram de 18,1%; -12%; -7,4% e 10,3% e -5,3, respectivamente. Na aplicação da parametrização feita para a mesorregião e aplicada a microrregião, as diferenças relativas entre a produtividade modelada e o IBGE variaram entre -15% e 10%. Na análise da produtividade nos municípios pertencentes à microrregião de Alfenas, observou-se que as diferenças relativas variaram entre 1,2% a 55,3%, maiores do que aquelas encontradas nas escalas regionais. As diferenças entre os dados modelados e as informações cedidas pelo IBGE (referência) podem estar relacionadas tanto à escala regional de calibração do modelo que não descreve as variações em escalas municipais das áreas cafeeiras quanto à subjetividade dos dados adotados como referência.
- A modelagem de produtividade em consórcio com dados de campo pode auxiliar a formação de estoques e comercialização do produto, bem como na elaboração de políticas agrícolas. Entretanto, ressalta-se que embora os dados de rendimento real não sejam dados de entrada, eles são utilizados para testar o desempenho do modelo, portanto a qualidade da modelagem depende da qualidade dos métodos de aquisição dos dados de entrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUALI, M. **Harmonic Analysis of Time Series (HANTS)**. 2011. Disponível em <<http://mabouali.wordpress.com/projects/harmonic-analysis-of-time-series-hants/>>. Acesso em: ago. 2015.
- ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, v.83, p. 56 - 61, 1991.
- ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; MOREIRA, M. A.; DEPPE, F. Avaliação de diferentes escalas temporais de chuva obtidos por modelos matemáticos e por sensoriamento remoto para o Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14., 2006, Forianópolis, SC.. **Anais...** Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-94550508ca7ed4ac7547f4660aafe1fb.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2013.
- ADAMI, M. **Estimativa da data de plantio da soja por meio de séries temporais de imagens MODIS**. 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.15.21.47/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2016.
- ALFONSI, E. L. **Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do cafeeiro**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.
- ALLEN, L.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, T.S. **Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de Minas Gerais**. 2013. 80 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMORIM NETO, M.S.A. **Balço hídrico segundo Thornthwaith e Mather (1955)**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 1989. (Comunicado Técnico, 34).
- ARAÚJO, M.A.; SOUZA, J.L.M.; TSUKAHARA, R.Y. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011.
- ARCILA-PULGARÍN, J.; CHAVES-CÓRDOBA, B. Desarrollo foliar del cafeto em três densidades de siembra. **Cenicafé**, v. 46, n. 1, p. 5-20, 1995.
- ASSAD, E. D; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. M. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n.11, p. 1057-1064, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ (ABIC). **Estatísticas - exportação mundial**. 2016. Disponível em: <http://abic.com.br/estatisticas/exportacoes/exportacao-mundial/>. Acesso em: 22 maio 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ (ABIC). **Estatística**. Disponível em: <http://abic.com.br/estatisticas/>. Acesso em: 22 abr. 2016.

ATZBERGER, C.; EILERS, P.H.C. Evaluating the effectiveness of smoothing algorithms in the absence of ground reference measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 13, p. 3689 - 3709, 2011.

BAEZ-GONZALEZ, A.D.; KINIRY, J.R.; MAAS, S.J.; TISCARENO, M.L.; MACIAS, J.C.; MENDOZA, J.L.; RICHARDSON, C.W.; SALINAS, J.G.; MANJARREZ, J.R. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. **Agronomic Journal**, v. 97, p. 418-425, 2005.

BAIER, W. Note on the terminology of crop-weather models. **Agricultural Meteorology**, v. 20, n. 2, p. 137-145, 1979.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E.; OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 253-261, 2010.

BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: USP, 1992. 17 p.

BARBOSA, J.P.R.A.D.; MARTINS, G.A.; FERREIRA, R.T.; PENNACCHI, J.P.; SOUZA, V.F.; SOARES, A.M. Estimativa do IAF de cafeeiro a partir do volume de folhas e arquitetura da planta. **Coffee Science**, v. 7, n. 3, p. 267-274, 2012.

BEAUMONT, J.H. An analysis of growth and yield relationships of coffee trees in the Kona District, Hawaii. **Journal of Agricultural Research**, v. 69, n. 3, 1939.

BENKE, K.K.; LOWELL, K.E.; HAMILTON, A.J. Parameter uncertainty, sensitivity analysis and prediction error in a water-balance hydrological model. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 47, p. 1134-1149, 2008.

BERNARDES, T. **Modelagem de dados espectrais e agrometeorológicos para estimativa da produtividade de café**. 2013. 126 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DLLLQ8>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

BISCARO, G.A. **Meteorologia agrícola básica**. [S.l.]: UNIGRAF, 2007.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n.2, p. 265-278, 1994.

- BOLTON, D.K.; FRIEDL, M.A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 173, p. 74-84, 2013.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 704-716, 1996.
- BORGA, M.; STOFFEL, M.; MARCHI, L.; MARRA, F.; JAKOB, M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater system: flash floods and debris flows. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 194-205, 2014.
- BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.
- BRUNO, I.P.; SILVA, A.L.; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O.O.S.; VOLPE, C.A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 3, p. 215-220, 2007.
- CABEZAS-GUTIÉRREZ, M.; PEÑA, F.; DUARTE, H.W.; COLORADO, J.F.; LORA SILVA, L. Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. **Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**, v.12, n.1, p.121-130, 2009.
- CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. **Ecosistema**, v.9, p.165-171, 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.; SANTOS, M.A.; PEDRO JUNIOR., M.J.; FAHL, J.I.; BRUNINI, O.; MEIRELES, E.J.; BARDIN, L. Modelo agrometeorológico de monitoramento de quebra de produtividade como subsídio à previsão de safra de café: resultados preliminares. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL (SPCB), 3, 2003, Porto Seguro, BA. **Anais...** Disponível em: <<http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/consorcio/separador2/simposio-de-pesquisa-dos-cafes-do-brasil/544-anais-do-iii-simposio-de-pesquisa-dos-cafes-do-brasil>>. Acessado em: 02 fev. 2016.
- CAMARGO, M.B.P.; ROLIM, G.S.; SANTOS, M.A. Modelagem agroclimatológica do café: estimativa e mapeamento das produtividades. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, p. 58-65, 2007.
- 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.
- CAMPAROTTO, L.B.; BLAIN G.C.; GIAROLLA, A.; ADAMI, M.; CAMARGO, M.B.P. Validação de dados termoplúviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 665-67, 2013.

CAMPOS, R.C. **Modelo de transferência radiativa para dosséis descontínuos regulares (GRART): aplicação para dosséis de café**. 2009. 154 p. (INPE-15678-TDI/1452). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.06.17.52/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

CARRASCO-BENAVIDES, M.; ORTEGA-FARÍAS, S.; LAGOS, L.O.; KLEISSL, J.; MORALES-SALINAS, L.; KILIC, A. Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. **Remote Sensing**, v. 6, p. 11342–11371, 2014.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; ALVES, H.M.R. Modelo de regressão para a previsão de produtividade de cafeeiros no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2, p. 204-211, 2004.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA (CEPAGRI). **Geadas: condições de ocorrência e cuidados**. Disponível em: <https://www.cpa.unicamp.br/artigos-especiais/geadas.html>. Acesso em: 12 jun. 2017.

CHOU, S.C. Modelo regional ETA. **Boletim do Climanálise Especial - Comemoração dos 10 anos**. 1996. Disponível em: <http://climanálise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

CHOUDHURY, B.J.; AHMED, N.U.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; DAUGHTRY, C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**, n. 50, p.1-17, 1994.

COCHRAN, W.G. **Sampling techniques**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1977. 428p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café (2011)**. Brasília: Conab, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café (2012)**. Brasília: Conab, 2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café (2013)**. Brasília: Conab, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café (2014)**. Brasília: Conab, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: café (2015)**. Brasília: Conab, 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2016.

- COUTO JUNIOR., A.F.; CARVALHO JUNIOR.; O.A.; MARTINS, E.S.; GUERRA, A.F. Phenological characterization of coffee crop (*Coffea arabica* L.) from MODIS time series. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 4, p. 569-578, 2013.
- CROSETTO, M.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 81, p. 71 - 79, 2000.
- DELÉCOLLE, R.; MAAS, S.J.; GUÉRIF, M.; BARET, F. Remote sensing and crop production models: present trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 47, p. 145-161, 1992.
- DORAISWAMY, P.C.; COOK, P.W. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 43-51, 1995.
- DORIGO, W.A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n.9, p. 165 – 193, 2007.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33).
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v. 55, n. Esp., p. 46 - 50, 1998.
- DOURADO-NETO, D.; VAN LIER, Q.J.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, n.1, 87-95, 2010.
- DUAN, S.; LI, Z.; WU, H.; TANG, B.; MA, L.; ZHAO, E.; LI, C. Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 12–20, 2014.
- EDIRIWEERA, S.; PATHIRANA, S.; DANAHER, T.; NICHOLS, D.; MOFFIET, T. Evaluation of different topographic corrections for Landsat TM data by prediction of Foliage Projective Cover (FPC) in topographically complex landscapes. **Remote Sensing**, v. 5, p. 6767-6789, 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Clima**. 2018. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 18 jun. 2018.
- 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, p. 439-447, 1994.

- EPIPHANIO, J.C. N.; NOVO, E. M.L.M.; MACHADO, L.A.T. **Espaço**. São Paulo: Blucher, 2010. 157 p.
- FAIVRE, R.; LEENHARDT, D.; VOLTZ, M.; BENOÎT, M.; PAPY, F.; DEDIEU, G.; WALLACH, D. Spatialising crop models. **Agronomie**, v. 24, p. 205–217, 2004.
- FAZUOLI, L.C.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P. Aquecimento global, mudanças climáticas e a cafeicultura paulista. **O Agrônômico**, v.59, n.1, p.19-20, 2007.
- FERNANDES, J.P.R.; TARASONA, T.A.; PISNICHENKO, I. Sistemas convectivos de mesoescala e precipitação intensa no semi-árido brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004. Fortaleza, CE. **Anais...** 2004.
- FISCHER, R.A.; BYERLEE, D.; EDMEADES, G.O. 2014. **Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?** [S.l.]: Australian Centre for International Agricultural Research, 2014. 634p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT**. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- FORD, A. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems**. Washington: Island Press, 2009. 400 p.
- FOSCHIERA, W. **Estimativa de produtividade da cana-de-açúcar com base na associação entre séries de dados MODIS e estatísticas agrícolas**. 2015. 73p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- FRANCHITO, S.H.; RAO, B.; VASQUES, A.C.; SANTO, C.M.E.; CONFORTE, J.C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p.1-9, 2009.
- FU, Y.; YANG, G., WANG, J.; SONG, X.; FENG, H. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth, analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 100, p. 51-59, 2014.
- FUNK, C.C.; PETERSON, P.J.; LANDSFELD, M.F.; PEDREROS, D.H.; VERDIN, J.P.; ROWLAND, J.D.; ROMERO, B.E.; HUSAK, G.J.; MICHAELSEN, J.C.; VERDIN, A.P. **A quasi-global precipitation time series for drought monitoring**. [S.l.]: US Geological Survey, 2014.
- GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 523-534, 2005.

GALVÃO, L.S.; ROBERTS, D.A.; FORMAGGIO, A.R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F.M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 846-856, 2009.

GAO, B. NDWI - A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.

GAO, H.; TANG, Q.; FERGUSON, C.R.; WOOD, E.F.; LETTENMAIER, D.P. Estimating the water budget of major US river basins via remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, p. 3955-3978, 2010.

GHIL, M.; ALLEN, M.R.; DETTINGER, M.D.; IDE, K.; KONDRASHOV, D.; MANN, M.E.; ROBERTSON, A.W.; SAUNDERS, A.; TIAN, Y.; VARADI, F.; YIOU, P. Advanced spectral methods for climatic time series. **Reviews of Geophysics**, v. 40, n.1, p. 1 - 41, 2002.

GLENN, E.P.; HUETE, A.R.; NAGLER, P.L.; HIRSCHBOECK, K.K.; BROWN, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 26, p. 139-168, 2007.

GODOY, M.J.S.; ASSAD, M.L.L. Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 685-694, 2002.

GOUVEIA, N.M. **Estudo da diferenciação e crescimento das gemas florais de Coffea arabica L.:** observações sobre antese e maturação dos frutos. 1984. 237 p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, 1984.

GUERIF, M.; DUKE, C.L. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 81, p. 57-69, 2000.

HAMAR, D.; FERENCZ, CS.; LICHTENBERGER, J.; TARCSAIGY. FERENCZ-ÁRKOS, I. Yield estimation for corn and wheat in the Hungarian Great Plain using Landsat MSS data. **International Journal of Remote Sensing**, n. 17, p. 1689-1699, 1996.

HANSEN, J.W.; JONES, J.W. Scaling-up crop models for climate variability applications. **Agricultural Systems**, v. 65, p. 43-72, 2000.

HANTSON, S.; CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, p. 691-700, 2011.

HINZMAN, L.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 19, p. 47-61, 1986.

HOLBIG, C.A.; GOMES, J.L.; CHOU, S.C.; OSÓRIO, C. Correção estatística das previsões de temperatura e umidade relativa a 2 metros do Modelo Eta-15km para aprimorar as estimativas de carga do sistema elétrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 16., 2015. Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** 2015.

HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

HUGHES, D.A. Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks. **Journal of Hydrology**, v. 327, p. 399 – 410, 2006.

INTERNACIONAL COFFEE ORGANIZATION (OIC). **Estatísticas do comércio**. Disponível em: http://www.ico.org/pt/trade_statistics.asp. Acesso em: 24 abr 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisas agropecuárias**: série relatórios metodológicos. 2002. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv1265.pdf>. Acesso em: 22 maio 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de biomas e de vegetação**. 2010. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>. Acesso em: 18 jun. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção**. 2016. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 maio 2016.

IORI, P.; DIAS JUNIOR., M.S.; AJAYI, A.E.; GUIMARÃES, P.T.G.; ABREU JR., A.A. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a red-yellow latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 107-117, 2014.

JAPIASSÚ, L.B.; GARCIA, A.L.A; PADILHA, L.; CARVALHO, C.H.S. Ciclos de poda em lavouras cafeeiras conduzidas no sistema “safra zero”. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6., 2009, Vitória, ES. **Anais...** Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio6/192.pdf. Acesso em: 02 fev. 2016.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T.(Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2, p.1-22.

JIANG, Z.W.; CHEN, Z.X.; CHEN, J.; LIU, J.; REN, J.Q.; LI, Z.N.; SUN, L.; LI, H. Application of crop model data assimilation with a particle filter for estimating regional winter wheat yields. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.7, p. 4422–4431, 2014.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; SOBRINO, J.A.; GUANTER, L.; MORENO, J.; PLAZA, A.; MARTÍNEZ, P. Fractional vegetation cover estimation from PROBA/CHRIS data: methods, analysis of angular effects and application to the land surface emissivity retrieval. In: WORKSHOP CHRIS/PROBA, 3., 2005, Frascati, Italy. **Proceedings...** Frascati, 2005.

KANDASAMY, S.; BARET, F.; VERGER, A.; NEVEUX, P.; WEISS, M.A. Comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations: application to MODIS LAI products. **Biogeosciences**, v. 10, p. 4055–4071, 2013.

KATSANOS, D.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S. Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period. **Atmospheric Research**, v.169, p. 459-464, 2016.

KHANDU, J.L.A.; FOROOTANA, E. An evaluation of high-resolution gridded precipitation products over Bhutan (1998–2012). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 1067-1087, 2016.

KOGAN, F.; KUSSUL, N., ADAMENKO, T.; SKAKUN, S.; KRAVCHENKO, O.; KRYVOBOK, O.; SHELESTOV, A.; KOLOTII, A.; KUSSUL, O.; LAVRENYUK, A. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.23, p.192–203, 2013.

KOWALIK, W.; DABROWSKA-ZIELINSKA, K.; MERONI, M.; RACZKA, T.U.; DE WIT, A. Yield estimation using SPOT-VEGETATION products: a case study of wheat in European countries. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 228-239, 2014.

KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M.; GOWER, S.T. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, p. 69-88, 1998.

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.P., SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1451-1462, 2007.

LEENHARDT, D.; VOLTZ, M.; RAMBAL, S. A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. **European Journal of Agronomy**, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1995.

LEMOES FILHO, L. C.A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A. W.P.; ALVES JUNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p. 1294-1303, 2010.

LI, H.; CHEN, Z.; JIANG, Z.; WU, W.; REN, J.; LIU, B. Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 2, p.266-285, 2017.

LIAQAT M.U.; CHEEMA M.J.M.; HUANG W.; MAHMOOD T.; ZAMANA M.; KHAN M.M. Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 39-47, 2017.

LIMA, R.N.S.; RIBEIRO, C.B. Comparação de métodos de correção topográfica em imagens Landsat sob diferentes condições de iluminação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 5, p. 1097-1116, 2014.

LIZASO, J.I.; BATCHELOR, W.D.; WESTGATE, M.E. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. **Field Crops Research**, v.80, p. 1-17, 2003.

LIU, W. T. H.; LIU, B. W. Y. Modelo de previsão de produtividade de café no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4., 1986, Brasília, DF. **Anais...** 1986. p. 38-47.

LOBELL, D. The use of satellite data for crop yield gap analysis. **Field Crops Research**, v. 143, p. 56-64, 2013.

LUIZ, A.J.B. **Estatísticas agrícolas por amostragem auxiliadas pelo sensoriamento remoto**. 2009. 112 p. (INPE-15661-TDI/1437). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

LUKEBA, J.L.; VUMILIA, R.K.; NKONGOLO, K.C.K.; MWABILA, M.L.; TSUMBU, M. Growth and leaf area index simulation in maize (*Zea mays* L.) under small-scale farm conditions in a Sub-Saharan African Region. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, p. 575-583, 2013.

MATTAR, C.; FRANCH, B.; SOBRINO, J.A.; CORBARI, C.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; OLIVERA-GUERRA, L.; SKOKOVIC, D.; SÓRIA, G.; OLTRA-CARRIÒ, R.; JULIEN, Y.; MANCINI, M. Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 23-43, 2014.

MATIELLO, J.B. Fatores que afetam a produtividade do café do Brasil. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Eds.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: KP potafos, 1986. cap. 1, p. 1-11.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura do café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2005. 438 p.

MATIELLO, J.B. Ciclo bienal de produção de café no Brasil. **Revista do Café**, n. 833, 2010. Disponível em: <http://www.cccrj.com.br/revista/833/10.htm>. Acesso em: 28 jan. 2016.

MEIRELES, E.J.L.M.; CAMARGO, M.B.P.; PEZZOPANE, J.R.M., THOMAZIELLO, R.A.; FAHL, J.I.; BARDIN, L.; SANTOS, J.C.F.; ANTÔNIO, L.B.; GARCIA, W.R.; MIGUEL, A.E.; FERREIRA, R.A. **Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 128 p. (Documentos / Embrapa Café, 5).

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; LAZIC, L.; LYRA, A.A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63–79, 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Café no Brasil**. 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>. Acesso em: 08 maio 2017.

MIRANDA, W.L. **Validação de modelo fenológico de produtividade de cafeeiro no sul do Estado de Minas Gerais**. 2015. 100 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. 530 p. ISBN: 978-85-62817-00-7.

MOREIRA, E.P. **Correção radiométrica do efeito de iluminação solar induzido pela topografia**. 2014. 86 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

MOREIRA, E.P.; VALERIANO, M.M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 208–217, 2014.

MOREIRA, E.P.; VALERIANO, M.M.; SANCHES, I.D.A.; FORMAGGIO, A.R. Efeito topográfico sobre dados TM/Landsat e impactos sobre índices de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 17, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0982.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

MURTHY, V.R.K.; Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. In: SIVAKUMAR, M.V.K.; ROY, P.S.; HARMSEN, K.; SAHA, S.K. (Eds). **Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology**. Geneva: WMO, 2003. p. 235-261.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Tropical rainfall measuring mission (TRMM)**. 2017. Disponível em: <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 12 nov. 2017.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (NOAA). **Global Forecast System (GFS)**. 2017. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> Acesso em: 13 out. 2017.

NOGUEIRA, S.M.C. **Aplicação de um modelo agrometeorológico-espectral e de variáveis meteorológicas do modelo ETA para estimar a produtividade do trigo**. 2014. 87 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

NOGUEIRA, S.M.C.; MOREIRA, M.A.; VOLPATO, M.M.L. Evaluating precipitation estimates from Eta, TRMM and CHRIPS data in the South-Southeast region of Minas Gerais State – Brazil. **Remote Sensing**, v.10, n.313, 2018.

- NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G.R.; SCHMUGGE, T.J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2003, Tolouse, France. **Proceedings...** Tolouse, 2003.
- OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A.; GOODRICH, D.C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, p. 7100–7114, 2014.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (OIC). **Dados estatísticos da Organização Internacional do Café**. 2018. Disponível em: http://www.ico.org/pt/about_statistics_p.asp. Acesso em: 12 fev. 2018.
- OTENG-DARKO, P.; YEBOAH, S.; ADDY, S.N.T.; AMPONSAH, S.; OWUSU DANQUAH, E. Crop modeling a tool for agricultural research: a review. **Journal of Agricultural Research and Development**, v. 2, p. 001-006, 2013.
- PADILLA, F.L.M.; MAAS, S.J.; GONZÁLEZ-DUGO, M.P.; MANSILLA, F.; RAJAN, N.; GAVILÁNA, P.; DOMÍNGUEZ, J. Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. **Field Crops Research**, v. 130, p. 145-154, 2012.
- PAREDES-TREJO, F.J.; BARBOSA, H.A.; LAKSHMI KUMAR, T.V. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.139, p. 26-40, 2017.
- PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JR., M.J.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**, v.62, n.3, p.499-505, 2003.
- PICINI, A.G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (Coffea arabica L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. 1998. 150 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.
- 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**, v. 58, n. 1, p. 157-170, 1999.
- PICOLI, M.C.A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva**. 2006. 90 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.
- PINO, F.A. Estimativa subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, v.31, p.55-58, 2001.
- PINTO, L.I.C.; COSTA, M.H.; DINIZ, L.M.F.; SEDIYAMA, G.C.; PRUSKI, F.F. Comparação de produtos de radiação solar incidente à superfície para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.4, p. 469-478, 2010.

RAMIREZ, G.M. **Uso de imagens de alta e média resolução espacial no estudo de áreas cafeiras**. 2009. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

RASMUSSE, M.S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3431-3442, 1992.

RAUFF, K.O.; BELLO, R. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. **Agricultural Sciences**, v. 6, p. 1098-1105, 2015.

REN, J.; CHEN, Z.; ZHOU, Q.; TANG, H. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 403-413, 2008.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. **Fisiologia do cafeeiro**. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Eds.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Editora K P Potafos, 1985. cap. 2, p. 13-66.

REZENDE, F.C.; CALDAS, A.L.D.; SCALCO, M.S.; FARIA, M.A. Índice de área foliar, densidade de plantio e manejo de irrigação do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 374-384, 2014.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

ROBINSON, S.; ARBEZ, G.; BIRTA, L.G.; TOLK, A.; WAGNER, G. Conceptual modeling definition, purpose and benefits. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2015. **Proceedings...** 2015.

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. 145 p. (INPE-14791-TDI/1234). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

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**, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114p. (INPE-3744-TDL/202). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985. Disponível em:<<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GNpic>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 182-192, 1990.

SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, SHIBAYAMA M, ISHITSUKA N, OHNO H A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p.366-374, 2005.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, v. 163, p. 273-292, 2002.

SANTOS, M. A. **Parametrização de coeficientes de sensibilidade e teste de modelos agrometeorológicos de estimativa de quebra de produtividade do cafeeiro (Coffea arábica L.)**. 138p. 2005. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2005.

SANTOS, M.A.; CAMARGO, M.B.P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.65, n.1, p.173-183, 2006.

SANTOS, M.A.; CAMARGO, M.B.P.; FAHL, J.I.; PEDRO, M.J.; FAZUOLI, L.C.; LORENA, B. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro (Coffea arabica L.) para diferentes escalas: planta, talhão, propriedade e município. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL (SPCB), 4, 2005, Londrina, PR. **Anais...** Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/2024/166733_Art042f.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 02 fev. 2016.

SCHNEIDER, U.; ZIESE, M.; BECKER, A.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; FINGER, P. **Global precipitation analysis products of the GPCC**. Germany: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), 2015.

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

SHEP-FIELD, J.; FERGUSON, C.R.; TROY, T.J.; WOOD, E.F.; MCCABE, M.F. Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing. **Geophysical Research Letters**, v. 36, p. 1-5, 2009.

SHIMABUKURO, Y.E.; PONZONI, F.J. Orbital sensors data applied to vegetation studies. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 6, p. 873-886, 2012.

SILVA, G.L.S.P.; VICENTE, J.R.; CASER, D.V. Avaliação de previsões de rendimento de culturas no Estado de São Paulo, fornecidas por modelos agrometeorológicos, anos agrícolas 1984/85 e 1985/86. **Informações Econômicas**, v.17, n.6, p.6145, 1987.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, R.B. Modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade de duas variedades de café arábica considerando a variabilidade espacial. **Irriga**, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2011.

SILVA, L.C.; SILVA FILHO, M.P.; AGUIAR, F.A.; NAVES, V.L.; LIRA, J.M.S.; RAMBAL, S.; MOUILLOT, F.; PENNACCHI, J.P.; BARBOSA, J.P.R.A.D. Conhecendo o IAF do cafeeiro arábica através do índice de vegetação por diferença normalizada. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9., 2015, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SPCB, 2015. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/3649>. Acesso em: 04 fev. 2016.

SOENEN, S. A.; PEDDLE, D. R.; COBURN, C. A. SCS+C: a modified sun-canopysensor topographic correction in forested terrain. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 9, p. 2148-2159, 2005. DOI: 10.1109/TGRS.2005.852480.

SOROOSHIAN, S.; HSU, K.L.; GAO, X.; GUPTA, H.V.; IMAM, B.; BRAITHWAITE, D. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, p. 2035–2046, 2000.

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n.2, p. 153-163, 2008.

SUGAWARA, L. M. **Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. 2002. 181p. (INPE-8702-TDI/794). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em:<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2002/11.18.18.05>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

SUGAWARA, L.M. **Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio do modelo agrônômico**. 2010. 116 p. (INPE-10.08.14.39-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38CSKHB>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

TARASOVA, T.A.; FERNANDEZ, J.P.R.; PISNICHENKO, I.A.; MARENGO, J.A.; CEBALLOS, J.C.; BOTTINO, M.J. Impact of new solar radiation parameterization in the Eta Model on the simulation of summer climate over South America. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, p. 318-333, 2006.

TAUGOURDEAU, S.; MAIRE, G.; AVELINO, J.; JONES, J.R.; RAMIREZ, L.G.; QUESADA, M.J.; CHARBONNIER, F.; GÓMEZ-DELGADO, F.; HARMAND, J.; RAPIDEL, B.; VAAST, P.; ROUPSARD, O. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: an application for coffee agroforestry. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n. 192, p. 19-37, 2014.

TEILLET; P.M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D.G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 8, p. 84-106, 1982.

THOMPSON, S.K. On sampling and experiments. **Environmetrics**, v. 13, p.429–436, 2002.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerron, N. J.: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955.

TOSELLO, R.N.; ARRUDA, H.V. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica, no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 21, n. 27, 1962.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 OLI/TIRS Surface Reflectance (LaSRC)**. 2018. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-quality-assessment>. Acesso em: 20 mar. 2018.

VAAST, P.; BERTRAND, B.; PERRIOT, J.; GUYOT, B.; GÉNARD, M. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.86, n.2, p.197-204, 2006.

VALÊNCIA, A. G. Relación entre el índice de área foliar y productividad del cafeto. **Cenicafé**, v. 24, n. 4, p. 79-89, 1973.

VALERIANO, M.M.V. Reflectância espectral de culturas agrícolas (II): Modelagem. **Espaço & Geografia**, v. 6; n. 1; p. 29-47, 2003.

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAND, Z. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4 - 17, 2013.

VICTORINO, E.C.; CARVALHO, L.G.; FERREIRA, D.F. Modelagem agrometeorológico para a previsão de produtividade de cafeeiros na Região Sul do Estado de Minas Gerais. **Coffee Science**, v.11, n.2, p. 211-220, 2016.

VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; CHOU, S. C.; MARTIN, T. N. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.39, n. 2, p. 412-420, 2009.

WATSON, D.J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 4, p. 101-144, 1952.

WEILL, M.A.M.; ARRUDA, F.B.; OLIVEIRA, J.B.; DONZELI, P.L.; RAIJ, B. Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) no Oeste Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 891-901, 1999.

YANG, P.; TAN, G.X.; ZHA, Y.; SHIBASAKI, R. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate crop yield in north China. In: ISPRS CONGRESS, 20, 2004. **Proceedings...** 2004. p. 150-156.

YOUNAN, N.H.; KING, R.L. Classification of hyperspectral data: a comparative study. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 41 - 53, 2004.

ZACHARIAS, A.O.; CAMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Modelo agrometeorológico de estimativa do início da florada plena do cafeeiro. **Bragantia**, v.67, n.1, p.249-256, 2008.

ZULKAFLI, Z.; BUYTAERT, W.; ONOF, C.; MANZ, B.; TARNAVSKY, E.; LAVADO, W.; GUYOT, J. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean–Amazon River Basins. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, p. 581–592, 2014.

APÊNDICE A: VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

As variáveis e as equações utilizadas para a transformação dos dados horários em dados diários estão descritas na **Tabela A.1**:

Tabela A.1 Equações para adequação dos dados meteorológicos provenientes do modelo ETA.

Variável	Equação
Precipitação diária	$P_d = \sum_1^n P \quad (A.1)$
Velocidade do vento diária	$Vel_d = \sum_1^n \frac{Vel}{n} * 0,748 \quad (A.2)$
Radiação Solar Incidente diária	$R_d = \sum_1^n \frac{R}{n} * 0,0864 \quad (A.3)$
Temperatura Média diária	$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (A.4)$
Umidade Relativa horária	$UR_h = 100 * \frac{6,1094 * EXP^{\frac{17,625 * T_d}{T_d + 243,04}}}{6,1094 * EXP^{\frac{17,625 * T}{T + 243,04}}} \quad (A.5)$
Umidade Relativa diária	$UR_d = \sum_1^n \frac{UR_h}{n} \quad (A.6)$

em que: P_d = precipitação diária, [mm]; P = precipitação horária, [mm]; Vel_d = velocidade do vento diária a 2 m de altura, [mm/s]; Vel = velocidade do vento horária a 10 m de altura, [mm/s]; R_d = Radiação Solar Incidente diária, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R = Radiação solar incidente horária, [W.m⁻²]; T_{med} = Temperatura média diária do ar, [°C]; T_{max} = Temperatura máxima diária do ar, [°C]; T_{min} = Temperatura mínima diária do ar, [°C]; T_d = Temperatura horária de ponto de orvalho, [°C]; T = Temperatura horária do ar a 2 m de altura, [°C]; UR_h = Umidade Relativa horária; [%]; UR_d = Umidade Relativa diária; [%]; n = número de horários disponíveis (para 2009 a 2011, $n = 4$; para 2012 a 2015, $n = 8$).

Fonte: Autor.

A variável precipitação foi acumulada para o período correspondente à resolução temporal do sensor (MOD13Q1 – mosaico de 16 dias), para as demais variáveis foram extraídos os valores médios para o mesmo período de tempo.

APÊNDICE B: PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS

Este apêndice descreve a metodologia utilizada para quantificar a produtividade potencial de culturas agrícolas desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979) e a metodologia para estimativa da produção de matéria seca bruta (PMB) desenvolvida por Barbieri e Tuon (1992).

A produtividade potencial (Y_p) é a produtividade esperada de uma cultivar, adaptada ao ambiente com ótimo manejo agrônômico (nutrientes e insumos), na ausência de estresses abióticos (como déficit hídrico) e estresses bióticos (pragas e doenças) que limitem seu rendimento (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FISCHER et al., 2014). Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a produtividade potencial é dada pela **Equação B.1**:

$$Y_p = F_{cc} * F_r * FPA * ND * PMB \quad (\text{B.1})$$

em que: F_{cc} = fator de compensação do crescimento; F_r = fator de respiração; FPA = fator de produtividade agrícola; ND = número de dias; PMB = produção de matéria seca bruta do grupo da cultura [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$].

O fator F_{cc} varia de 0 a 1 e refere-se à correção da produtividade em relação ao índice de área foliar. Segundo Barbieri e Tuon (1992), com índice de área foliar maior ou igual a 5 a cultura já recobriu todo o solo, portanto, F_{cc} máximo é igual a 0,5. Entretanto, durante o ciclo fenológico há aumento gradativo do IAF até a máxima expansão foliar, sendo necessária a correção sobre índices menores do que 5. Conforme descrito por Berka et al. (2003), o fator é expresso pela **Equação B.2**.

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,644 - (0,515 * IAF))} \quad (\text{B.2})$$

em que: F_{cc} = fator de compensação do crescimento; IAF = índice de área foliar.

O fator de respiração depende da temperatura (maior temperatura, maior respiração) e refere-se ao consumo de carboidratos pela planta nos processos de fotorrespiração e própria manutenção (BARBIERI; TUON, 1992). À temperatura inferior a 20°C , o fator

de respiração corresponde a 0,6 (60%), caso contrário o fator de respiração é de 0,5 (50%) (DOOREMBOS; KASSAM, 1979).

O fator de produtividade agrícola (FPA) ou coeficiente de colheita diz respeito a parte da matéria seca de interesse econômico, ou seja, a matéria seca líquida (DOOREMBOS; KASSAM, 1979; BARBIERI; TUON, 1992). Nesse caso, F_{pa} é uma variável de parametrização do modelo.

No âmbito do sensoriamento remoto, o intervalo temporal entre duas medidas (ND) refere-se ao passo do modelo, nesse caso, refere-se ao número de dias de cada período da composição de imagens do índice de vegetação do sensor MODIS.

A produção de matéria seca bruta (PMB) das culturas agrícolas é estimada através das seguintes equações:

- Se $t_m > 20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hora}^{-1}$, então:

$$PMB = F * (0,8 + 0,01 * t_m) * t_n + (1 - F) * (0,5 + 0,025 * t_m) * t_c \quad (\text{B.3})$$

- Se $t_m < 20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hora}^{-1}$, então:

$$PMB = F * (0,5 + 0,025 * t_m) * t_n + (1 - F) * (0,05 * t_m) * t_c \quad (\text{B.4})$$

em que: PMB = produção de matéria seca bruta, [kg/ha/dia]; F = fração do dia em que o céu está encoberto; t_m = taxa de produção de matéria seca da cultura de café ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$); t_n = taxa de produção de matéria seca de uma cultura padrão em dias completamente nublados ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$); t_c = taxa de produção de uma cultura padrão em dias claros ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$).

O fator F corresponde a fração de energia disponível na ocorrência de céu encoberto e é descrito por Doorenbos e Kassam (1979), como:

$$F = \frac{(R_{SO} - (0,5 * R_S))}{0,8 * R_{SO}} \quad (\text{B.5})$$

sendo: F = fração de energia disponível na ocorrência de céu encoberto; R_{SO} = máxima radiação de onda curta recebida em dias claros, [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$]; R_S = radiação de onda curta real incidente, [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$].

De acordo com Doorenbos e Kassam (1979) uma cultura padrão possui taxa de produção de matéria seca (t_m) igual a $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$, entretanto, essa taxa é variável e dependente do tipo de cultura e da temperatura média ambiente (T_{med}). A produção de matéria seca para cultura do café é descrita na **Tabela B.1**.

Tabela B.1 Taxa de produção de matéria seca (t_m) para cultura do café (Planta C3) em função da temperatura média do ar (T_{med})

T_{med} (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
t_m (kg/ha/hora)	0	0	15	32.5	35	35	32.5	5	0

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979, p. 12 – Tabela 5, grupo *I warm*).

Os fatores t_n e t_c correspondem a taxa de produção de matéria seca de uma cultura padrão em dias completamente nublados e a taxa de produção de uma cultura padrão em dias claros, respectivamente. Os valores de t_n e t_c dependem da latitude e do período do ano e estão descritos na **Tabela B.2**.

Tabela B.2 Taxa de produção de matéria seca em dias claros (t_c) e em dias nublados (t_n)

Sul - Lat 20°	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun
t_c (kg·ha ⁻¹ ·dia ⁻¹)	334	371	407	439	460	468	465	451	425	387	348	325
t_n (kg·ha ⁻¹ ·dia ⁻¹)	170	193	215	235	246	250	249	242	226	203	178	164

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979) – Tabela 3, pág. 9.

Baseados em Doorenbos e Kassam (1979), os autores Barbieri e Tuon (1992) desenvolveram a metodologia para estimativa da produção de matéria seca bruta (PMB) de culturas agrícolas. As equações para determinação de PMB desenvolvidas pelos autores são descritas abaixo.

$$PMB = F * cT_o * y_o + (1 - F) * cT_c * y_c \quad (\text{B.6})$$

$$y_o = 31,7 + 0,219 * R_a \quad (\text{B.7})$$

$$y_c = 107,2 + 0,360 * R_a \quad (\text{B.8})$$

em que: PMB = produção de matéria seca bruta, [kg/ha/dia]; y_o = Taxa de produção de matéria seca máxima de uma cultura para um dia completamente nublado, [kg/ha/dia];

y_c = Taxa de produção de matéria seca máxima de uma cultura para um dia completamente claro (sem nuvens), [kg/ha/dia]; R_a = radiação extraterrestre, [$\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$].

De acordo com Barbieri e Tuon (1992), os valores y_o e y_c são equacionadas para temperaturas padronizadas, devendo ser corrigidas através dos fatores cT_o e cT_c para uso em condições ambientais reais. Esses fatores dependem da temperatura média e do grupo de culturas, as equações de cT_o e cT_c para grupo de plantas C3 são apresentadas a seguir:

- Para $16,5^\circ\text{C} \leq T_{med} \leq 37^\circ\text{C}$

$$cT_o = 0,583 + 0,014 * T_{med} + 0,0013 * T_{med}^2 - 0,000037 * T_{med}^3 \quad (\text{B.9})$$

$$cT_c = -0,0425 + 0,035 * T_{med} + 0,00325 * T_{med}^2 - 0,0000925 * T_{med}^3 \quad (\text{B.10})$$

- Para $T_{med} < 16,5^\circ\text{C}$ ou $T_{med} > 37^\circ\text{C}$

$$cT_o = -0,0425 + 0,035 * T_{med} + 0,00325 * T_{med}^2 - 0,0000925 * T_{med}^3 \quad (\text{B.11})$$

$$cT_c = -1,085 + 0,07 * T_{med} + 0,0065 * T_{med}^2 + 0,000185 * T_{med}^3 \quad (\text{B.12})$$

em que: cT_o = fator de correção para dias nublados; cT_c = fator de correção para dias claros; T_{med} = temperatura média do ar, [$^\circ\text{C}$].

APÊNDICE C: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET₀)

Todas as equações reproduzidas abaixo são utilizadas na estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e estão descritas em Allen et al. (1998).

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - (0,0065 * z)}{293} \right)^{5,26} \quad (C.1)$$

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} * P \quad (C.2)$$

$$\Delta = \frac{4098 * 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (C.3)$$

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (C.4)$$

$$e^o(T) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (C.5)$$

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (C.6)$$

$$e_a = \frac{UR * e_s}{100} \quad (C.7)$$

$$\omega_s = \arcsin[-\operatorname{tg}(\varphi) * \operatorname{tg}(\delta)] \quad (C.8)$$

$$\delta = 0,409 * \operatorname{sen} \left[\left(\frac{2\pi}{365} * J \right) - 1,39 \right] \quad (C.9)$$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{2\pi}{365} * J \right) \quad (C.10)$$

$$R_a = \frac{24 * (60)}{\pi} * G_{sc} * d_r * [\omega_s * \operatorname{sen}(\varphi) * \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \operatorname{sen}(\omega_s)] \quad (C.11)$$

$$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s \quad (C.12)$$

$$R_s = \left(a_s + b_s * \frac{n}{N} \right) * R_a \quad (C.13)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (C.14)$$

$$R_{nl} = \sigma * \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (C.15)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (C.16)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (C.17)$$

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (C.18)$$

em que: P = pressão atmosférica, [kPa]; z = elevação do ponto acima do nível do mar, [m]; γ = constante psicrométrica, [kPa.°C⁻¹]; T_{med} = temperatura média do ar, [°C]; Δ = inclinação da curva de pressão de vapor de saturação, [kPa.°C⁻¹]; $e^o(T)$ = pressão de saturação de vapor na temperatura T, [kPa]; e_s = pressão de saturação de vapor, [kPa]; e_a = pressão de vapor atual,

[kPa]; UR = umidade relativa, [%]; ω_s = ângulo horário do Sol, [rad]; φ = latitude, [rad]; δ = declinação solar, [rad]; J = é o número de dias no ano = [DOY]; R_a = radiação extraterrestre, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; d_r = inverso da distância relativa Terra- Sol; G_{sc} = constante solar = 0,0820 MJ.m⁻².min⁻¹; N = duração máxima possível da luz do sol ou luz do dia horas, [hora]; $a_s = 0,25$ e $b_s = 0,50$; n = duração real da luz do sol, [horas]; R_s = radiação de onda curta real incidente, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_{SO} = máxima radiação de onda curta recebida em dias claros, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_n = saldo de radiação, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_{ns} = radiação líquida de ondas curtas, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_{nl} = radiação líquida de onda longa de saída, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; σ = constante de Stefan-Boltzmann, [4,903 x 10⁻⁹ MJ.K⁻⁴.m⁻².dia⁻¹]; $T_{max,K}$ = temperatura máxima absoluta durante o período de 24 horas, [Kelvin]; $T_{min,K}$ = temperatura mínima absoluta durante o período de 24 horas, [Kelvin]; α = albedo ou coeficiente de reflexão da copa = 23%; G = Fluxo de calor do solo, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; u_2 = velocidade do vento a 2 m de altitude, [m.s⁻¹]; ET_0 = evapotranspiração potencial de referência, [mm.dia⁻¹].

APÊNDICE D: BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

O balanço hídrico é a contabilização de entrada (precipitação e/ou irrigação) e saída (evapotranspiração) de água do solo. No método interagem os efeitos edáficos através do conhecimento do armazenamento de água que é função das características físicas do solo e o climático através da precipitação e evapotranspiração (NETO, 1989).

Para a aplicação do balanço hídrico é necessário definir o armazenamento máximo no solo (CAD), dispor de dados de chuva total, estimativa da evapotranspiração potencial (ET_0) em cada período e a profundidade efetiva de raiz ($D = 1$ m, para cultura cafeeira). De posse dessas informações é possível determinar a evapotranspiração real (ET_r), a deficiência hídrica (DEF), o excedente hídrico (EXC) e o total de água retida no solo (ALT) em cada período através do método de Thornthwaith e Mather (1955). O mapa de CAD (**Figura F.1**) foi desenvolvido de acordo com o procedimento realizado por Rizzi (2004). As equações para execução do BH são as seguintes:

1. Saldo: é a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração da cultura. Quando a diferença é positiva, as exigências hídricas da cultura são plenamente satisfeitas e/ou há excesso de água no solo, caso contrário, há deficiência hídrica e o desenvolvimento da cultura é prejudicado.

$$S = P - ETP \quad (D.1)$$

$$ETP = k_c * ET_0 \quad (D.2)$$

em que: S = saldo, [mm]; P = precipitação; [mm]; ETP = evapotranspiração máxima da cultura, [mm]; k_c = coeficiente da cultura = 1; ET_0 = evapotranspiração potencial de referência, [mm.dia⁻¹].

2. Armazenamento de água disponível: representa a quantidade de água disponível no solo. Deve-se ressaltar que o armazenamento inicial é determinado quando o solo se encontra na capacidade de campo (final da estação úmida).

$$ARM_{n-1} = CAD * D \quad (D.3)$$

em que: ARM_{n-1} = armazenamento inicial, [mm]; CAD = capacidade de armazenamento de solo, [mm.cm⁻¹]; D = profundidade efetiva de raiz, [cm].

3. Negativo acumulado: refere-se ao somatório dos valores de $P-ET_c < 0$. O negativo acumulado e o armazenamento de água são dependentes e devem ser estimados simultaneamente.

- Se $S \geq 0$ e $(ARM_{n-1} + S) \leq CAD$:

$$ARM_n = ARM_{n-1} + S \quad (D.4)$$

$$NAC = CAD * LN\left(\frac{ARM_n}{CAD}\right) \quad (D.5)$$

- Se $S < 0$:

- $NAC_{n-1} \geq 0$: $NA_c = S$ (D.6)

- $NAC_{n-1} < 0$: $NA_c = S + NAC_{n-1}$ (D.7)

$$ARM_f = CAD * EXP\left(\frac{NAC}{CAD}\right) \quad (D.8)$$

em que: NAC_{n-1} = negativo acumulado no período anterior, [mm]; NA_c = negativo acumulado, [mm]; ARM_n = Armazenamento final, [mm]; ARM_{n-1} = armazenamento inicial, [mm]; S = saldo, [mm]; CAD = capacidade de armazenamento de solo, [mm.cm⁻¹].

No decorrer do ciclo da cultura, o armazenamento inicial do período (n) é igual ao armazenamento final do período anterior (n-1) e sempre menor ou igual a CAD do solo.

4. Alteração: representa os ganhos (+) e perdas (-) do solo em função das alterações do armazenamento.

$$ALT = ARM_n - ARM_{n-1} \quad (D.9)$$

em que: ALT = variação do armazenamento no solo, [mm]; ARM_n = Armazenamento final, [mm]; ARM_{n-1} = armazenamento inicial, [mm].

5. Déficit hídrico: diferença entre a precipitação e evapotranspiração da cultura. Ocorre déficit hídrico quando a precipitação e/ou a água armazenada no solo são inferiores à evapotranspiração máxima da cultura, nesse caso, $ETR < ETP$.

$$\text{Se } P < ETP: DEF = ETP - ETR, \text{ senão } DEF = 0 \quad (\text{D.10})$$

em que: DEF = déficit hídrico, [mm]; P = precipitação; [mm]; ETP = evapotranspiração máxima da cultura, [mm]; ETR = evapotranspiração real, [mm].

6. Excedente hídrico: ocorre quando a precipitação é superior à evapotranspiração da cultura, refere-se à água que não pode ser retida ou drena em profundidade, e que excede a capacidade de armazenamento de água do solo.

$$\text{Se } P > ETP \Rightarrow EXC = (P - ETP) - |ALT|, \text{ senão } EXC = 0 \quad (\text{D.11})$$

em que: EXC = excedente hídrico, [mm]; P = precipitação; [mm]; ETP = evapotranspiração máxima da cultura, [mm]; ALT = variação do armazenamento no solo, [mm].

7. Evapotranspiração real: é igual ou menor do que a evapotranspiração da cultura, refere-se a evapotranspiração da cultura em campo, com ou sem restrição de água.

$$\text{Se } S \geq 0 : ETR = ETP, \text{ senão } ETR = P + |ALT| \quad (\text{D.12})$$

em que: P = precipitação; [mm]; ETP = evapotranspiração máxima da cultura, [mm]; S = saldo, [mm]; ALT = variação do armazenamento no solo, [mm].

APÊNDICE E: TABELAS

Tabela E.1 Temperatura máxima média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.

MÊS	DOY	TMAX				
		2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
JUL	177	20,47	21,07	21,39	21,28	21,41
	193	21,79	21,33	20,75	21,13	20,33
AGO	209	22,02	22,78	21,45	21,86	20,89
	225	22,02	24,03	21,22	21,50	22,48
SET	241	24,09	24,75	24,51	22,53	23,32
	257	25,50	24,17	23,73	24,44	25,09
OUT	273	24,04	25,05	23,77	22,23	24,05
	289	26,25	23,50	25,25	25,65	25,98
NOV	305	24,95	24,77	24,67	24,40	25,42
	321	27,08	25,18	25,50	23,89	24,29
DEZ	337	26,68	25,72	25,62	25,82	25,57
	353	25,11	26,17	26,58	25,54	26,29
JAN	1	24,04	23,89	24,20	27,31	27,77
	17	29,75	25,04	24,63	26,63	26,03
FEV	33	29,20	25,98	25,46	26,58	26,09
	49	24,60	26,45	25,17	25,79	25,92
MAR	65	24,27	24,20	24,28	25,58	24,37
	81	25,99	25,11	24,07	24,24	25,47
ABR	97	26,63	24,36	23,31	24,65	24,32
	113	24,46	22,24	23,03	22,41	23,50
MAI	129	22,01	20,33	21,96	22,16	21,14
	145	20,57	22,41	21,84	22,08	22,50
JUN	161	20,82	22,03	21,95	21,27	21,62
MÍNIMO		20,47	20,33	20,75	21,13	20,33
MÉDIA		24,45	23,94	23,67	23,87	24,08
MÁXIMO		29,75	26,45	26,58	27,31	27,77

Fonte: Autor.

Tabela E.2 Temperatura máxima na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.

MÊS	DOY	TMAX _{ÁREA}				
		2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
JUL	177	22,46	22,45	23,83	23,86	23,85
	193	23,85	23,19	23,20	23,40	22,70
AGO	209	24,11	24,24	24,35	24,45	23,81
	225	24,54	26,54	24,28	24,32	25,74
SET	241	26,53	27,27	28,30	26,11	27,23
	257	27,97	26,90	27,33	28,14	29,08
OUT	273	25,94	26,99	27,68	25,57	28,15
	289	28,41	25,64	28,75	28,76	29,26
NOV	305	27,71	26,35	27,61	27,04	27,94
	321	29,36	27,64	28,66	27,04	27,04
DEZ	337	28,03	28,53	27,93	28,75	28,09
	353	27,08	28,65	29,03	28,07	28,68
JAN	1	26,15	26,74	26,74	30,15	30,52
	17	31,08	27,77	27,23	29,23	28,62
FEV	33	30,43	28,75	27,93	29,35	28,60
	49	26,33	29,08	28,46	28,75	28,39
MAR	65	26,21	27,00	26,36	28,59	26,33
	81	27,11	27,97	26,85	27,11	28,02
ABR	97	28,41	27,02	25,78	27,01	26,97
	113	26,00	24,63	25,58	24,98	26,24
MAI	129	23,95	23,27	24,52	24,67	23,71
	145	22,31	24,43	24,20	24,44	24,96
JUN	161	22,85	24,53	24,44	24,17	24,17
MÍNIMO		22,31	22,45	23,20	23,40	22,70
MÉDIA		26,38	26,33	26,48	26,69	26,87
MÁXIMO		31,08	29,08	29,03	30,15	30,52

Fonte: Autor.

Tabela E.3 Temperatura mínima média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.

MÊS	DOY	TMIN				
		2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
JUL	177	13,11	13,46	12,90	12,88	13,23
	193	14,82	13,93	11,89	12,51	11,24
AGO	209	14,12	14,91	12,12	12,08	11,35
	225	12,40	15,18	11,54	12,02	12,90
SET	241	14,81	14,57	14,11	11,95	12,98
	257	16,77	14,48	14,00	15,09	15,10
OUT	273	16,46	17,91	14,27	13,81	14,02
	289	17,56	16,45	17,68	16,47	16,39
NOV	305	17,06	16,43	17,16	15,86	17,28
	321	19,30	17,20	16,31	17,71	16,94
DEZ	337	20,33	18,17	19,77	17,65	16,97
	353	19,65	18,69	19,44	18,53	19,34
JAN	1	19,37	17,07	18,38	18,47	19,00
	17	21,18	16,87	17,21	17,15	18,35
FEV	33	21,29	17,36	18,44	17,37	17,73
	49	19,08	17,67	17,65	16,77	16,85
MAR	65	18,70	16,11	18,20	17,48	17,30
	81	19,61	16,51	16,46	16,13	16,96
ABR	97	18,00	16,23	14,57	17,14	15,68
	113	17,17	14,17	13,22	12,86	13,83
MAI	129	14,10	11,92	13,71	13,17	12,66
	145	13,76	14,94	13,47	12,90	13,93
JUN	161	13,90	13,91	13,91	12,57	13,25
MÍNIMO		12,40	11,92	11,54	11,95	11,24
MÉDIA		17,07	15,83	15,50	15,15	15,36
MÁXIMO		21,29	18,69	19,77	18,53	19,34

Fonte: Autor.

Tabela E.4 Temperatura mínima na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.

MÊS	DOY	TMINÁREA				
		2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
JUL	177	9,45	10,74	10,22	10,01	10,98
	193	11,93	10,85	9,37	9,92	8,71
AGO	209	10,59	12,01	9,71	10,07	8,98
	225	9,13	12,07	9,31	9,03	10,22
SET	241	11,20	11,25	11,31	9,45	10,39
	257	13,56	10,88	11,15	12,12	12,66
OUT	273	12,41	14,60	11,56	10,66	11,31
	289	13,92	12,84	14,66	13,19	13,33
NOV	305	13,38	12,50	13,53	12,45	13,56
	321	15,78	13,77	12,76	14,59	13,67
DEZ	337	16,49	14,65	16,21	14,14	13,78
	353	16,16	15,14	16,32	15,50	16,21
JAN	1	16,59	13,99	15,14	15,81	16,25
	17	17,60	13,90	13,91	14,60	15,25
FEV	33	17,65	14,67	15,43	15,02	14,74
	49	15,66	14,86	14,43	14,14	13,94
MAR	65	15,18	12,82	15,02	14,62	14,56
	81	15,78	13,15	13,34	12,81	13,50
ABR	97	14,74	13,16	11,27	13,65	12,45
	113	13,79	11,06	10,13	10,14	10,97
MAI	129	10,60	9,10	10,80	10,36	10,03
	145	10,11	11,91	10,51	10,55	11,34
JUN	161	10,18	11,07	10,95	10,21	10,88
MÍNIMO		9,13	9,10	9,31	9,03	8,71
MÉDIA		13,56	12,65	12,48	12,31	12,51
MÁXIMO		17,65	15,14	16,32	15,81	16,25

Fonte: Autor.

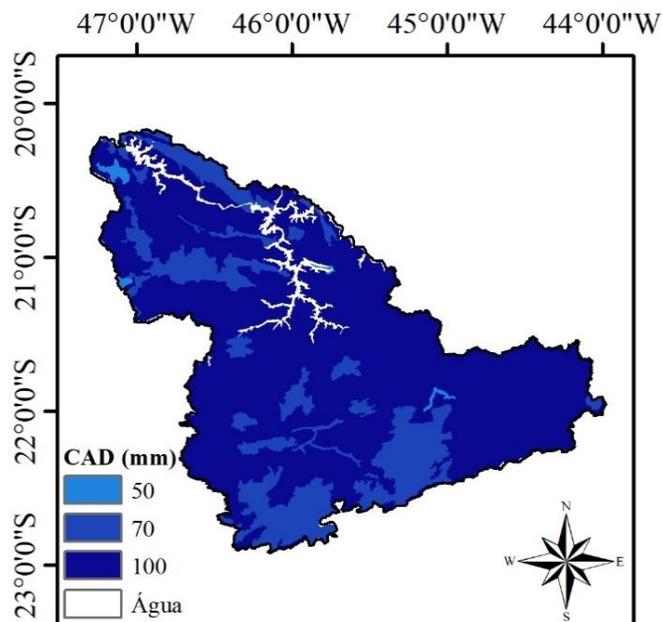
Tabela E.5 Temperatura média na mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.

MÊS	DOY	TMED				
		2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
JUL	177	16,79	17,26	17,14	17,08	17,32
	193	18,30	17,63	16,32	16,82	15,78
AGO	209	18,07	18,84	16,78	16,97	16,12
	225	17,21	19,61	16,38	16,76	17,69
SET	241	19,45	19,66	19,31	17,24	18,15
	257	21,13	19,32	18,86	19,76	20,10
OUT	273	20,25	21,48	19,02	18,02	19,03
	289	21,91	19,97	21,47	21,06	21,18
NOV	305	21,01	20,60	20,92	20,13	21,35
	321	23,19	21,19	20,90	20,80	20,62
DEZ	337	23,51	21,94	22,69	21,73	21,27
	353	22,38	22,43	23,01	22,04	22,81
JAN	1	21,71	20,48	21,29	22,89	23,38
	17	25,47	20,95	20,92	21,89	22,19
FEV	33	25,25	21,67	21,95	21,97	21,91
	49	21,84	22,06	21,41	21,28	21,38
MAR	65	21,48	20,15	21,24	21,53	20,83
	81	22,80	20,81	20,27	20,18	21,22
ABR	97	22,32	20,29	18,94	20,90	20,00
	113	20,82	18,20	18,12	17,64	18,66
MAI	129	18,06	16,12	17,83	17,67	16,90
	145	17,16	18,67	17,65	17,49	18,21
JUN	161	17,36	17,97	17,93	16,92	17,44
MÍNIMO		16,79	16,12	16,32	16,76	15,78
MÉDIA		20,76	19,88	19,58	19,51	19,72
MÁXIMO		25,47	22,43	23,01	22,89	23,38

Fonte: Autor.

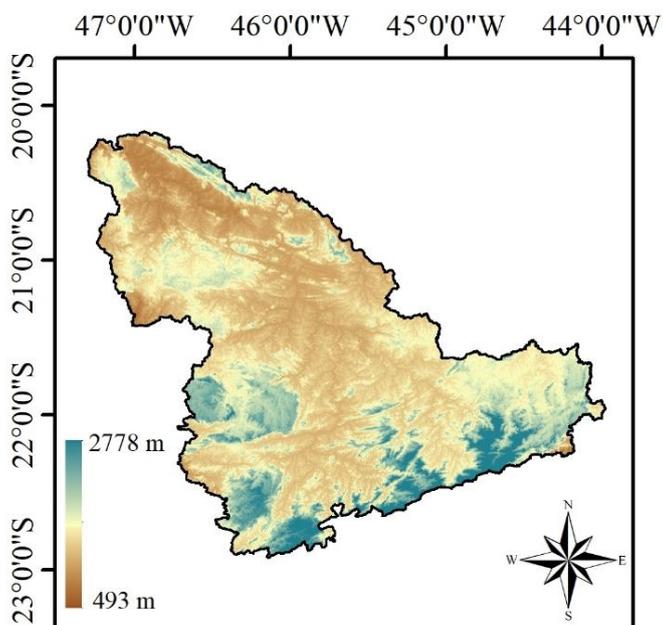
APÊNDICE F: MAPAS

Figura F.1 Distribuição do armazenamento máximo de água no solo (mm) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas baseado em Rizzi (2004).



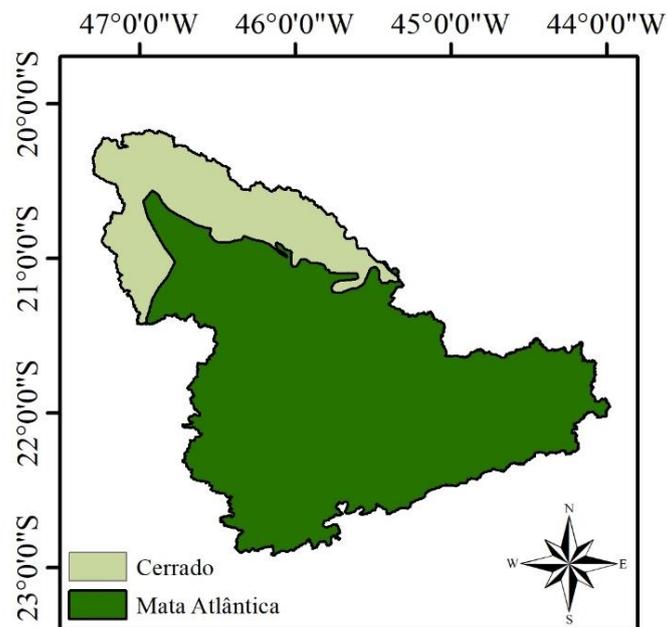
Fonte: Autor.

Figura F.2 Modelo digital de elevação para a Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas (SRTM/ 90m).



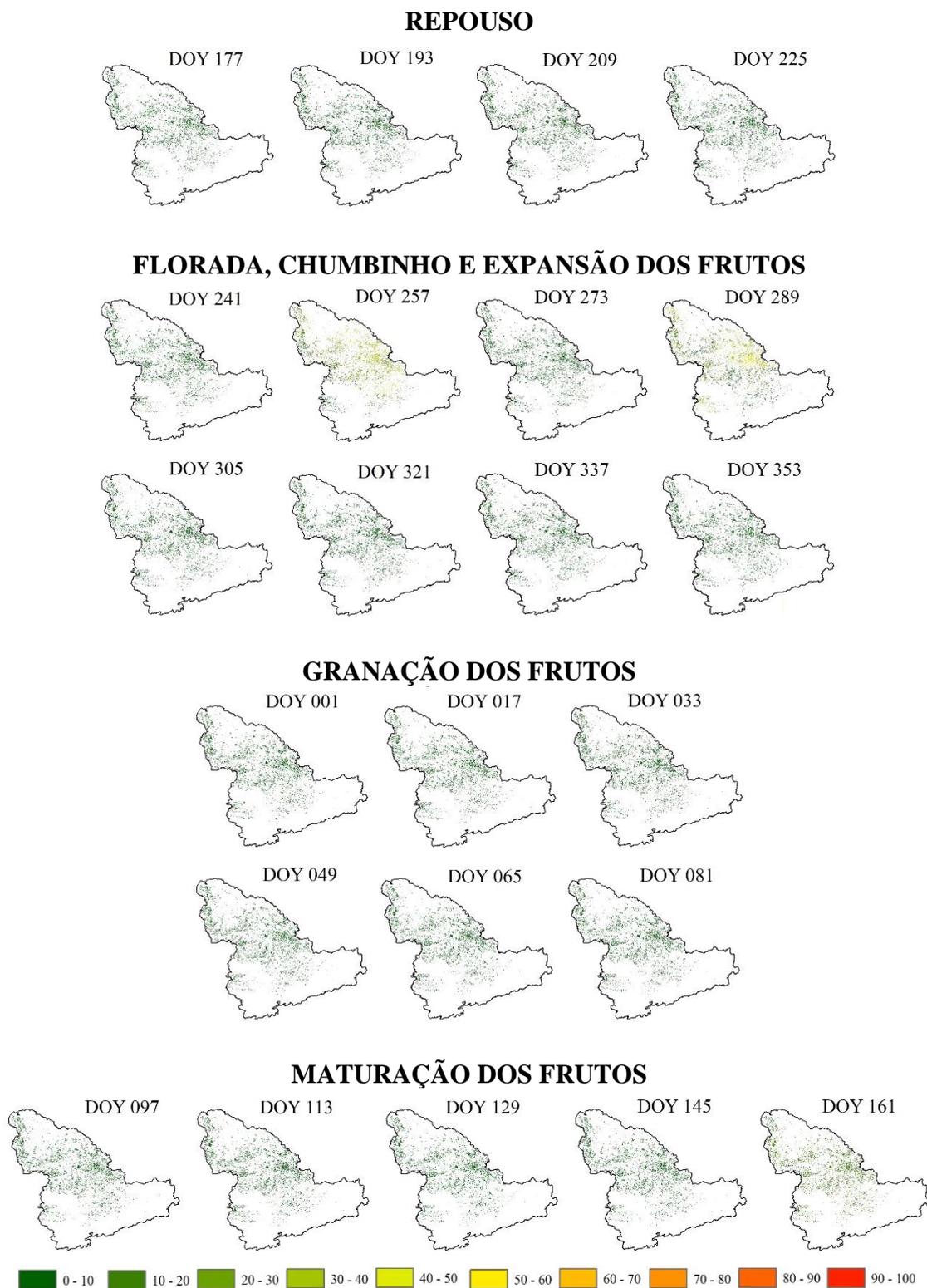
Fonte: Autor.

Figura F.3 Mapa de biomas da Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas.



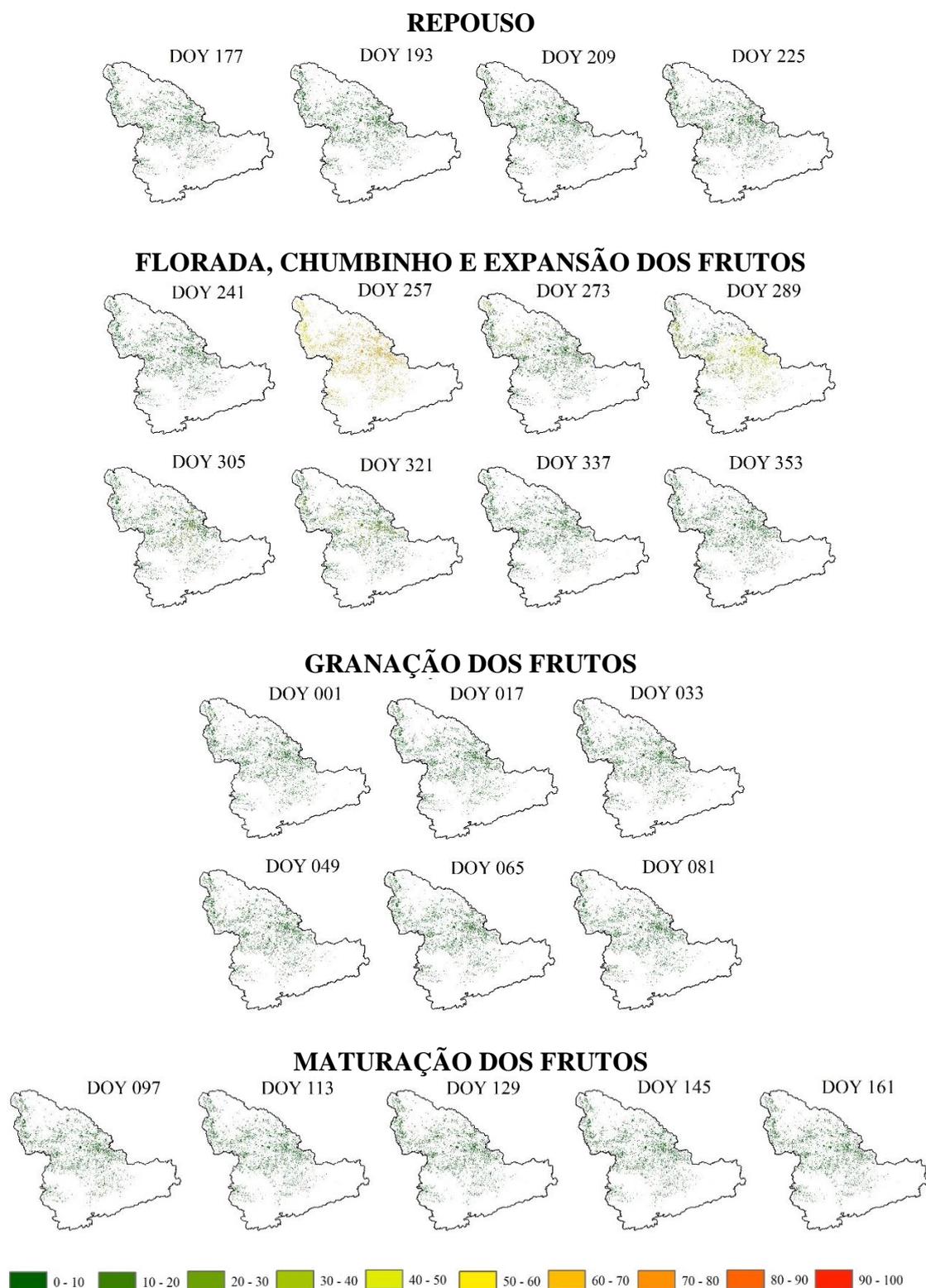
Fonte: IBGE (2010).

Figura F.4 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2010/2011.



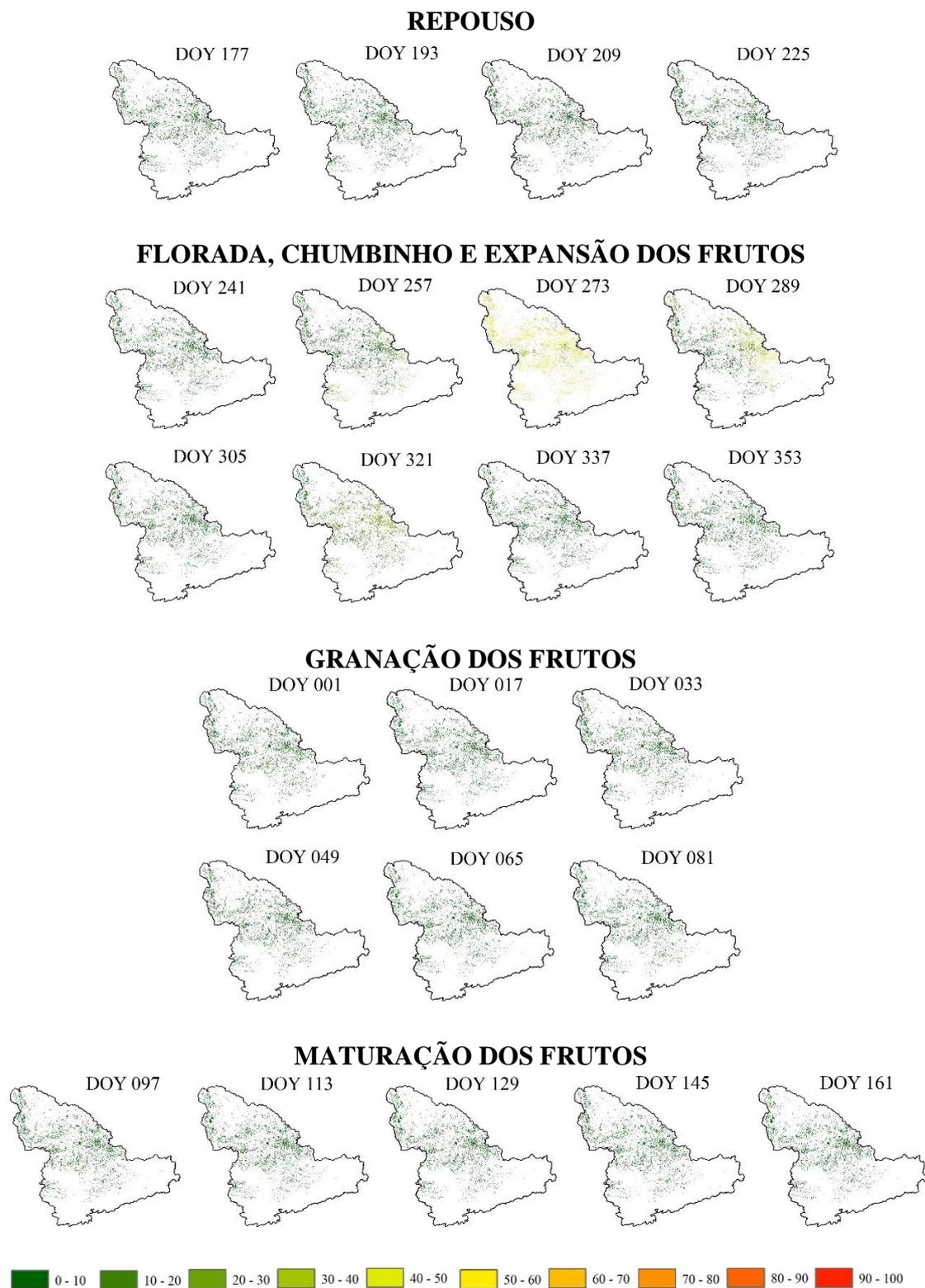
Fonte: Autor.

Figura F.5 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2011/2012.



Fonte: Autor.

Figura F.6 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2012/2013.



Fonte: Autor.

Figura F.7 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2013/2014.

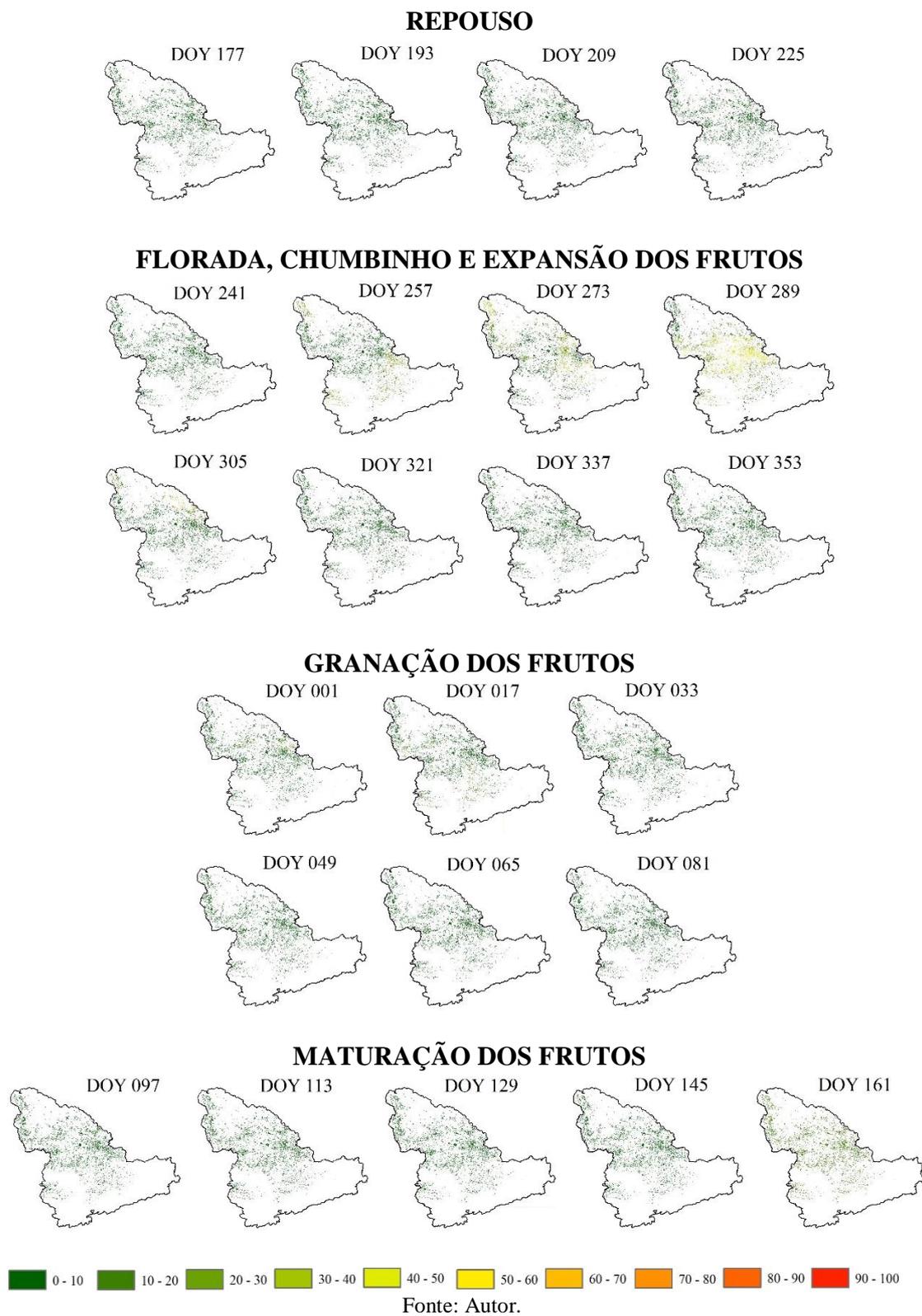
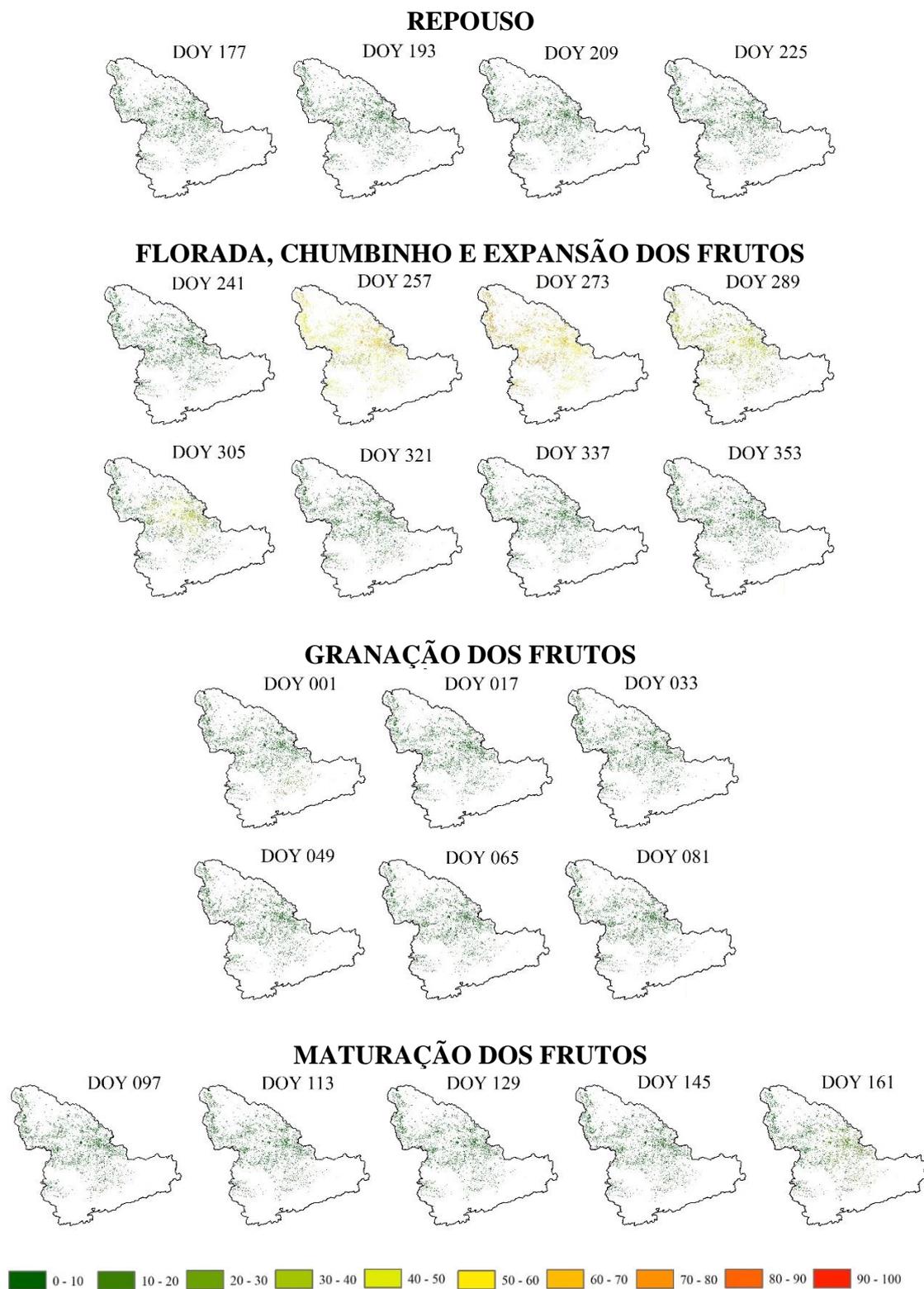


Figura F.8 Distribuição do índice de penalização (%) na Mesorregião Sul/Sudoeste de Minas para o ano safra 2014/2015.



Fonte: Autor.