

AVALIAÇÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DA EXPANSÃO DA
CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA
EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Fernanda Cristina Oliveira Tayt-Sohn

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Planejamento Energético, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em
Planejamento Energético.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Rio de Janeiro

Março de 2019

AVALIAÇÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DA EXPANSÃO DA
CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA
EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Fernanda Cristina Oliveira Tayt-Sohn

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Amaro Olímpio Pereira Junior, D.Sc.

Prof. Gutemberg Borges França, D.Sc

Prof. José Francisco de Oliveira Júnior, D.Sc.

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D.Sc.

Dr. Fausto Machado Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Tayt-Sohn, Fernanda Cristina Oliveira

Avaliação do zoneamento agroclimático da expansão da cana-de-açúcar sobre a bacia hidrográfica do rio Paranaíba em um cenário de mudanças climáticas/ Fernanda Cristina Oliveira Tayt-Sohn. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIV,173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 145-173.

1. Biocombustíveis. 2. Modelagem de Sistemas Agrícolas. 3. Evapotranspiração, 4. Cana-de-Açúcar, 5. Zoneamento Agroclimático. I. Pereira Júnior, Amaro Olímpio II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por iluminar meu caminho e me dar perseverança.

À minha mãe pela persistência, carinho e dedicação.

Ao meu marido Leonardo Nanes pela paciência, incentivo e carinho.

Ao meu orientador, Professor Amaro Pereira pelo apoio, paciência e incentivo.

À professora Ana Maria Bueno Nunes, pelo apoio, incentivo, e auxílio de questões acadêmicas.

A todos os professores do Programa de Planejamento Energético da COPPE, que muito contribuíram para minha formação.

Aos amigos Francisco Ayres Amorim, Rodrigo Carvalho de Sousa, Luan Santos, Joilson de Assis e Rosa Paes por toda a ajuda e apoio prestados durante o doutorado.

Ao professor Daniel Fonseca de Carvalho, pela concessão dos dados meteorológicos e de lisímetro de pesagem.

A usina Rio Verde Ltda pela concessão dos dados de produtividade da cana-de-açúcar, e em especial ao Rubens Massud Coury pela atenção.

A usina Energética Serranópolis Ltda pela concessão dos dados de produtividade da cana-de-açúcar, e em especial ao Luiz C. Valentin pela atenção.

À professora Rosmeri Porfirio da Rocha pela concessão de um espaço em seu laboratório na USP, pela atenção e pelos dados do CORDEX que foram concedidos.

Aos funcionários do Programa de Planejamento Energético da COPPE pelo suporte e atenção recebida, em particular Sandrinha e Paulo.

A PETROBRAS pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DA EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA EM UM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Fernanda Cristina Oliveira Tayt-Sohn

Março/2019

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Departamento: Planejamento Energético

O objetivo desta tese é avaliar as possibilidades de expansão da cana-de-açúcar, sobre a região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, traçando cenários que apresentem um menor impacto ambiental e uma maior produtividade potencial, através do zoneamento de aptidão agroclimática da cana-de-açúcar, frente aos cenários climatológico e de mudanças climáticas. Para tanto, foram utilizados dados climáticos de Reanálise 1 e de um modelo climático regional para os cenários climatológico, histórico e de mudanças climáticas (RCP 8.5), além dos resultados do modelo de sistema agrícola (DSSAT/CANEGRO) para a produtividade e a necessidade hídrica da cana-de-açúcar. As equações de evapotranspiração foram avaliadas, devido à sua importância dentro de um modelo de sistema agrícola, pois impactam as simulações de necessidade hídrica e produtividade. Posteriormente, foi selecionada e calibrada a equação de melhor desempenho sobre a bacia e, em seguida, inserida dentro do (DSSAT/CANEGRO). Criou-se, assim, uma ferramenta de maior realismo, a qual auxilia na formulação de um zoneamento agroclimático. A equação de evapotranspiração selecionada, que obteve um desempenho superior, foi (Priestley-Taylor modificada). Através do zoneamento formulado, traçou-se a melhor estratégia de expansão, a qual dá-se pela ocupação total (parcial) das áreas de pastagem no sudeste (sudoeste) da bacia, sendo colhida em maio ou agosto. Com toda a expansão projetada sendo passível de ocorrer dentro da bacia.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ASSESSING THE AGROCLIMATIC ZONING TO ETHANOL EXPANSION OVER PARANAÍBA RIVER BASIN UNDER A CLIMATE CHANGE SCENARIO

Fernanda Cristina Oliveira Tayt-Sohn

March/2019

Advisors: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Department: Energy Planning

Considering the issue of ethanol growing production projections, which has as consequence the expansion of sugarcane cultivation area and the possibilities of this to impact the environment, the hydric security and the land use were defined strategies to the sugarcane expansion with reduced impacts on environment through agroclimatic zoning, over the Paranaíba river basin. In this thesis, agroclimatic zoning were generated using datasets from Reanalysis 1, historical integrations and climate projections from RegCM4 (CORDEX) forced by the RCP 8.5, and information of sugarcane productivity and water deficit from agricultural system model (DSSAT/CANEGRO). Regarding to the importance of evapotranspiration estimative in agricultural system models, since it impacts the simulations of hydrological deficit and productivity, the main equations of evapotranspiration were evaluated considering the best performance over the basin, and then calibrated and written in the code of (DSSAT/CANEGRO). Therefore, were developed a tool capable of performing better simulations over the studied watershed, providing information with reduced uncertainty to the agroclimatic zoning. The work conclude that modified Priestley-Taylor equation performs better than the equation recommended by FAO (FAO 56-Penman-Monteith). Through the evaluation of agroclimatic zoning, the strategy defined, contemplating the scenario that impacts less the environment, is accomplished by the expansion over the entire (partial) pastureland in the southeast (southwest) region of the basin, with harvest happening on May and August.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	7
1.2	Estrutura da Tese	9
2.	RELAÇÃO ENTRE A NECESSIDADE HÍDRICA E A PRODUTIVIDADE	11
2.1	A Evapotranspiração	13
2.1.1	A Evapotranspiração Potencial	14
2.1.2	Evapotranspiração de Referência	15
2.1.3	Evapotranspiração Atual ou Real	15
2.1.4	Evapotranspiração da Cultura	15
2.2	Métodos de Cálculo da Evapotranspiração	16
2.2.1	A Equação do Balanço de Energia-Razão de Bowen	16
2.2.2	A Equação de Thornthwaite	18
2.2.3	A Equação de Penman	19
2.2.4	A Equação de Turc	20
2.2.5	A Equação de Makkin	21
2.2.6	A Equação de Blaney-Criddle	22
2.2.7	A Equação de Priestley & Taylor	23
2.2.8	A Equação de Camargo	24
2.2.9	A Equação de Penman-Monteith	25
2.2.10	A Equação de Hargreaves – Samani	27
2.2.11	A Equação de Stanghellini	27
2.2.12	A Equação da Radiação- Solar	29
2.3	Análise dos Métodos de Cálculo da Evapotranspiração no Brasil e no Mundo	30
3.	A MODELAGEM AGRÍCOLA	35
3.1.	Os Modelos de Sistema Agrícola	38
3.1.1	O Modelo APSIM	38
3.1.2	O Modelo EPIC	40
3.1.3	O Modelo STICS	41
3.1.4	O Modelo WOFOST	42
3.1.5	O Modelo CROPSYST	44
3.1.6	O Modelo INFOCROP	46
3.1.7	O Modelo CROPWAT	47
3.1.8	O Modelo DSSAT-CSM	49
3.2	CrITÉrios para a Seleção do Modelo de Sistema Agrícola	55

4.	O ZONEAMENTO COMO FERRAMENTA DO PLANEJAMENTO TERRITORIAL E AMBIENTAL	56
4.1	Tipos de Zoneamento	57
4.2	O Zoneamento como Ferramenta de Auxílio à Expansão	62
4.3	Zoneamentos Direcionados para a Cultura da Cana-de-Açúcar	63
4.4	Aplicação do Zoneamento na Tese	70
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	72
5.1	Área de Estudo	73
5.2	A Cana-de-Açúcar	76
5.3	Levantamento da Base de Dados	77
5.3.1	Levantamento dos Dados Lisimétricos de Evapotranspiração (FASE 1)	78
5.3.2	Levantamento dos Dados Meteorológicos (FASE 1)	80
5.3.2.1	Tratamento dos Dados Meteorológicos	81
5.3.3	Levantamento dos Produtos Meteorológicos (FASE 2)	82
5.3.3.1	Produtos de Reanálise para o Cenário Climatológico	82
5.3.3.1.1.	Tratamento dos Produtos da Reanálise I	85
5.3.3.2.	Dados Observados da Concentração de CO ₂ na Atmosfera	85
5.3.3.2.1.	Tratamento dos Dados Observados da Concentração de CO ₂ na Atmosfera	85
5.3.3.3.	Produtos Meteorológicos da Modelagem Climática Regional	85
5.3.3.3.1	Tratamento dos Produtos do CORDEX	87
5.3.3.4	Parâmetros da Concentração de CO ₂ na Atmosfera - Cenário Futuro	88
5.3.3.4.1.	Tratamento do Parâmetro de Concentração de CO ₂ na Atmosfera – Cenário Futuro	88
5.3.4	Levantamento de Dados Edáficos (FASE 2)	88
5.3.5	Levantamento de Dados da Cultura da Grama-Batatais (FASE 2)	89
5.3.6	Levantamento de Dados da Cultura da Cana-de-Açúcar (FASE 2)	89
5.3.7	Levantamento dos Dados de Manejo (FASE 2)	90
5.3.8	Levantamento dos Dados de Produtividade (FASE 2)	90
5.4	Métodos Aplicados	91
5.4.1	Fase 1: A Equação de Evapotranspiração	91
5.4.1.1	Validação da Equação de Evapotranspiração (FASE 1)	92
5.4.2	FASE 2: O Modelo DSSAT/CANEGRO	94
5.4.2.1	Análise de Sensibilidade do Modelo	94
5.4.2.1.1	Análise de Sensibilidade do Modelo – Evapotranspiração	94
5.4.2.1.2	Análise de Sensibilidade do Modelo - Produtividade da Cana-de-Açúcar	95
5.4.2.2	Tratamento dos Resultados do Modelo DSSAT/CANEGRO	96
5.5	Formulação do ZAPAC	97
5.5.1	Abordagens metodológicas do ZAPAC	97

5.5.2	Abordagem escolhida para formulação do ZAPAC	98
5.6	Análise da Expansão da Cana-de-Açúcar sobre a bacia hidrográfica do rio Paranaíba	98
5.7	Comparação entre as Pesquisas	99
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
6.1	Resultados da Evapotranspiração (FASE 1)	100
6.1.1	Inferência Estatística	100
6.1.2	Análise de Sensibilidade da Evapotranspiração	102
6.1.3	Análise de Sensibilidade da Produtividade em Relação ao Emprego de uma Nova Equação de Evapotranspiração	104
6.2.	Mapas da Temperatura média anual, da Produtividade da Cana-de-Açúcar e da Necessidade Hídrica	106
6.2.1	Mapa da Temperatura Média Anual na Bacia hidrográfica do rio Paranaíba	107
6.2.2	Mapa da Necessidade Hídrica da Cana-de-Açúcar	109
6.2.2.1	Plantio em Maio	109
6.2.2.2	Plantio em Agosto	112
6.2.2.3	Plantio em Novembro	115
6.2.3	Análise entre os diferentes mapas de necessidade hídrica	117
6.2.4	Mapas da produtividade da Cana-de-Açúcar	117
6.2.4.1	Plantio em Maio	118
6.2.4.2	Plantio em Agosto	121
6.2.4.3	Plantio em Novembro	124
6.2.5	Análise entre os diferentes mapas de produtividade	126
6.3	Zoneamento de Aptidão Climática da Cana-de-Açúcar	127
6.3.1	Aptidão Térmica da Cana-de-Açúcar	127
6.3.2	Aptidão Hídrica da Cana-de-Açúcar	129
6.3.2.1	Plantio em Maio	129
6.3.2.2	Plantio em Agosto	132
6.3.2.3	Plantio em Novembro	134
6.4	Discussão dos Resultados	135
6.4.1	Avaliação do ZAPAC e Escolha das Zonas para a Expansão da Cana-de-Açúcar	137
6.5	Comparação da Tese com os Resultados de TAYT-SOHN <i>et al.</i> (2018)	138
7	CONCLUSÕES	140
7.1	Limitações do Trabalho e Sugestões de Trabalhos Futuros	143
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

Lista de Figuras

Figura 1: Figura da concentração de áreas cultivadas com cana de açúcar entre os anos de 2005 e 2015	4
Figura 2: Área prospectada para o cultivo principal de cana-de-açúcar	5
Figura 3: Representação da variação da área plantada com cana-de-açúcar entre os anos de 2007 e 2014 no Brasil	6
Figura 4: Sequência de eventos da metodologia aplicada na tese	8
Figura 5: Fluxograma dos módulos do modelo de sistema agrícola WOFOST	44
Figura 6: Demonstrativo do esquema de funcionamento do modelo agrícola DSSAT	51
Figura 7: Fluxograma dos processos do modelo CANEGRO dentro do modelo DSSAT-CSM	54
Figura 8: Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar por zonas de aptidão	64
Figura 9: Mapa do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroenergético do estado de São Paulo	65
Figura 10: Zoneamento Edafoclimático da cana-de-açúcar	66
Figura 11: Zoneamento Agrícola de Risco Climático do clima corrente	67
Figura 12: Aptidão hídrica da bacia hidrográfica do rio Paranaíba	68
Figura 13: Aptidão Térmica da bacia hidrográfica do rio Paranaíba	69
Figura 14: Mapa do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	75
Figura 15: Histograma da precipitação média mensal para o período anual	79
Figura 16: Gráfico de dispersão das estimativas de evapotranspiração Priestley-Taylor modificada e FAO -56- Penman-Monteith em relação aos dados de lisímetro com eventos de chuva forte	101

Figura 17: Gráfico de dispersão de Priestley-Taylor modificada e FAO -56- Penman-Monteith em relação aos dados de lisímetro sem eventos de chuva forte	102
Figura 18: Gráfico de dispersão de Priestley-Taylor modificada e FAO -56- Penman-Monteith dentro do modelo DSSAT/CANEGRO em relação aos dados de lisímetro com eventos de chuva forte	103
Figura 19: Mapas da temperatura média anual	107
Figura 20: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Maio	109
Figura 21: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Agosto	112
Figura 22: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Novembro	115
Figura 23: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Maio	118
Figura 24: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Agosto	121
Figura 25: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Novembro	124
Figura 26: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515), para três níveis de risco	127
Figura 27: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515), com o plantio em Maio	129
Figura 28: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515) com o plantio em Agosto	132
Figura 29: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515) com o plantio em Novembro	134

Lista de Tabelas

Tabela 1: Representação dos critérios utilizados na metodologia do ZAE para a delimitação das zonas quanto à aptidão climática.	63
Tabela 2: Metodologia utilizada para a formulação do ZAPAC	98
Tabela 3: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM), com dados observados do experimento 1	100
Tabela 4: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM), com dados observados do experimento 2	102
Tabela 5: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM) dos resultados das Simulações do modelo DSSAT em relação aos dados observados do experimento 1	103
Tabela 6: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM) com dados observados da Usina Serranópolis e da Usina Rio Verde	104

Índice de Siglas

AEAC - Álcool Anidro: Álcool Etílico Anidro Carburante

AEHC - Álcool Hidratado: Álcool Etílico Hidratado Carburante

ANA – Agência Nacional de Águas

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

APCBs - Reservas Particulares para a Conservação da Biodiversidade

APSIM - *Agricultural Production System Simulator*

APSRU - *Agricultural Production Systems Research Unit*

CDO - *Climate Data Operators.*

CCGE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil

CMIP5 - *Coupled Model Intercomparison Project 5*

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CORDEX - *Coordinated Regional Downscaling Experiment*

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

DSSAT - *Decision Support System for Agrometeorology*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPIC - *Environmental Policy Integrated Climate Model.*

ERSL-*Earth System Research Laboratory*

ESM-LR - *Earth System Models Low Resolution.*

ESM2M - *Earth System Model 2M.*

EZ - Etnozoneamento

FAO – *Food and Agriculture Organization of United Station*

GFDL - *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISNA – Índice de Satisfação das Necessidades de Água

MCRs – Modelos Climáticos Regionais

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MPI - *Max-Planck-Institut für Meteorologie.*

NCARS - *National Center for Atmospheric Research Staff*

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OMM – Organização Meteorológica Mundial
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
PROALCOOL - Programa Nacional do Alcool
RCP 8.5 – *Representative Concentration Pathway 8.5*
RPPNs - Reservas Particulares do Patrimônio Nacional
SAEH – Segurança Alimentar, Energética e Hídrica
STICS - *Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard.*
UCs - Unidades de Conservação Ambiental
WCRP - *World Climate Research Programme*
WOFOST – *World Food Studies*
ZAA - Zoneamento Agroambiental
ZAE-CANA - Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar
ZAG - Zoneamento Agrícola
ZAPAC - Zoneamento de Aptidão Agroclimática
ZARC - Zoneamento Agrícola de Risco Climático
ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico
ZEEC - Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro
ZGA - Zoneamento Geoambiental
ZI - Zoneamento Industrial
ZSEE - Zoneamento Socioeconômico-Ecológico
ZU - Zoneamento Urbano

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos na área de planejamento energético e ambiental (*e.g.* DORNBURG *et al.* (2010); TILMAN *et al.* (2011); HOWELLS *et al.* (2013); TAYT-SOHN *et al.* (2018); BELLEZONI *et al.* (2018)) são baseados nas projeções futuras que relacionam o aumento da população, as mudanças climáticas e a demanda por combustíveis. Tendo como intuito, a análise dos possíveis cenários futuros em relação ao nexo da segurança alimentar, energética e hídrica (SAEH), além dos impactos ao meio ambiente.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) é um exemplo de instituição que elabora estudos multidisciplinares importantes, que têm como objetivo, dentre outros, avaliar maneiras de mitigar os impactos das mudanças climáticas em relação ao *nexus approach*¹ e aos impactos ocasionados ao meio ambiente (IPCC, 2014). Assim sendo, algumas medidas para mitigar os impactos das mudanças climáticas são apontadas pelo IPCC (2014), dentre elas, está o uso de biocombustíveis. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (ANP, 2018), os biocombustíveis podem ser definidos como:

Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores à combustão ou em outro tipo de geração de energia.

Os dois biocombustíveis líquidos mais utilizados no mundo são o biodiesel e o etanol. Sendo este último o que representa a maior parcela desse uso com 75% do total (EIA, 2017).

Na atual conjuntura mundial de biocombustíveis, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol. Juntos, Brasil e Estados Unidos, são responsáveis por

¹ *Nexus approach*- Abordagem dada a estudos que tentam transcender a análise individual, tendo como intento avaliar um sistema complexo em que os componentes possuem algum grau de interdependência e se inter-relacionam (UNU, 2018).

aproximadamente 84% da produção mundial desse biocombustível, apesar das matérias-primas utilizadas para tal produção serem diferentes nas duas regiões, sendo o milho a principal matéria prima nos Estados Unidos, e a cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2017; RFA, 2017).

Alguns fatores contribuíram de forma decisiva para que o Brasil alcançasse o nível atual de produção, tanto da cana-de-açúcar quanto do etanol, com destaque para: (1) o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), (2) o desenvolvimento tecnológico tanto do ponto de vista da gestão/planejamento agrícola quanto em termos do melhoramento genético, (3) as condições edafoclimáticas favoráveis brasileiras; e (4) a crescente preocupação ambiental e de segurança energética.

(1) O PROALCOOL foi instituído pelo governo brasileiro, em meados da década de 1970, com o intuito de impulsionar a produção de etanol e de atender tanto o mercado interno como externo. Esse programa foi constituído de duas fases (1975-1979, primeira fase) e (1979-1985, segunda fase), em ordem cronológica, teve como principais marcos: a adição de álcool anidro² à gasolina, o lançamento do primeiro carro movido a álcool, a produção de uma grande quantidade de álcool hidratado³, e o aumento do número de destilarias autônomas. Em 1988, o PROALCOOL terminou oficialmente (ROSILLO-CALLE e CORTEZ, 1998; GOLDEMBERG *et al.*, 2004; NASS *et al.*, 2007). Durante esse período a produção de etanol foi impulsionada e passou de uma produção anual de álcool etílico total de $580 \times 10^3 \text{ m}^3$ no início do PROALCOOL, para $11523 \times 10^3 \text{ m}^3$ no ano em que o programa terminou oficialmente (EPE, 2018).

(2) De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos-CGEE, a fase agrícola da produção de etanol teve um avanço significativo no quesito tecnológico, sendo apontados, por exemplo, o aumento contínuo da produtividade entre 1977 e 2003 (CGEE, 2013). De acordo com GOES *et al.* (2011), graças ao melhoramento genético e à melhoria do planejamento e gestão agrícola foi possível observar um crescimento de aproximadamente 50 % da produção de cana-de-açúcar nos últimos 30 anos. No estudo realizado por MEYERS *et al.* (2012) foi observado que todos os desenvolvimentos tecnológicos juntos, tanto os da fase industrial quanto os da fase agrícola, fizeram com

² Álcool Anidro: Álcool Etílico Anidro Carburante (AEAC) possui um teor de cerca de 0,5% em volume de água. Esse tipo de álcool é utilizado como aditivo à gasolina. Fonte: (ANP, 2017).

³ Álcool Hidratado: Álcool Etílico Hidratado Carburante (AEHC), combustível destinado aos carros movidos à etanol ou *flex-fuel*. Fonte: (ANP, 2017).

que a produtividade aumentasse em cerca de 60% com uma redução média de custos de 65%, entre os anos de 1976 e 2005. No último estudo, os preços de locação da terra, da manutenção de estoque, da preparação do solo, da colheita e do transporte foram levados em consideração.

(3) Historicamente, a cana-de-açúcar foi trazida para o Brasil há aproximadamente 500 anos. A partir dessa época, as boas condições edafoclimáticas brasileiras contribuíram e permanecem contribuindo para que a cana se perpetue no País (MOZZANBINI *et al.*, 2006; GRUZINSKI & BERNAND, 2006). Além disso, as condições citadas anteriormente favorecem a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, como mostrado no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar para todo o Brasil feito por MANZATTO *et al.* (2009), no qual é apontado que esta cultura teria aproximadamente 64 milhões de hectares de terra apta para expandir a produção.

(4) Como citado por (ELOBEID & HART, 2007), o aumento das preocupações ambientais e de segurança energética em todo o mundo estimulam a produção de biocombustíveis como a cana-de-açúcar.

De acordo com GOLDEMBERG (2007), a produção de etanol de primeira geração é considerada como o sistema mais eficiente de produção de biocombustíveis do mundo. Apesar de toda a eficiência da produção, e de toda essa preocupação com a SAEH, além da preocupação com o meio ambiente estar estimulando a produção de biocombustíveis, eles não podem ser considerados como fontes de energia de impacto zero. Tais impactos estão associados às diversas fases da produção de etanol, mas não se limitam apenas nesse quesito, pois há impactos associados à expansão destas produções tanto do ponto de vista agrícola quanto industrial (MACEDO *et al.*, 2004; BLOTTNITZ & CURRAN, 2007; MARTINELLI & FILOSO, 2008; LUO *et al.*, 2009; VON; RUDORFF *et al.*, 2010).

Assim sendo, uma das consequências do aumento da oferta e demanda mundial por biocombustíveis dá-se pelo aumento da área cultivada com cana-de-açúcar, o qual pode impactar o meio ambiente. Tal situação de expansão já vem sendo estudada nos últimos anos, em termos de observação da expansão e em termos da projeção dessa.

Em comparação com todas as regiões do Brasil, a região Centro-Oeste, onde foi observado um aumento da área cultivada com cana-de-açúcar de 2.8 milhões de hectares, é a região que registrou a maior taxa de crescimento entre os anos de

2005/2006 e 2015/2016 (CONAB, 2018). No estudo feito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2018), é possível observar a concentração de áreas de plantio de cana-de-açúcar entre os anos de 2005 e 2015 e a consequente expansão da cana-de-açúcar que houve na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1). SILVA & MIZIARA (2011) observaram um aumento de 372 %, de área cultivada com cana-de-açúcar em Goiás entre 2000 e 2009, sendo tal estado integrante da região Centro-Oeste. Se for considerado apenas a taxa de aumento da área plantada com cana-de-açúcar na mesorregião do sul de Goiás, o valor é ainda mais expressivo com um incremento de 432 % para o mesmo período.

De acordo com SHIKIDA (2013), o aumento no preço das terras no estado de São Paulo, que é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do País, está impulsionando a expansão da cana-de-açúcar para a região Centro-Oeste, apesar dessa região ainda apresentar alguns empecilhos à expansão como a falta de infraestrutura para o escoamento e armazenamento da produção. Apesar disso, tem sido apresentado maior incentivo ao crescimento da produção, pois, segundo SILVA & MIZIARA (2011), houve um aumento de recursos do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) fornecidos para o cultivo da cana-de-açúcar em regiões de expansão, sendo a maior parte destes locais pertencentes à Bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

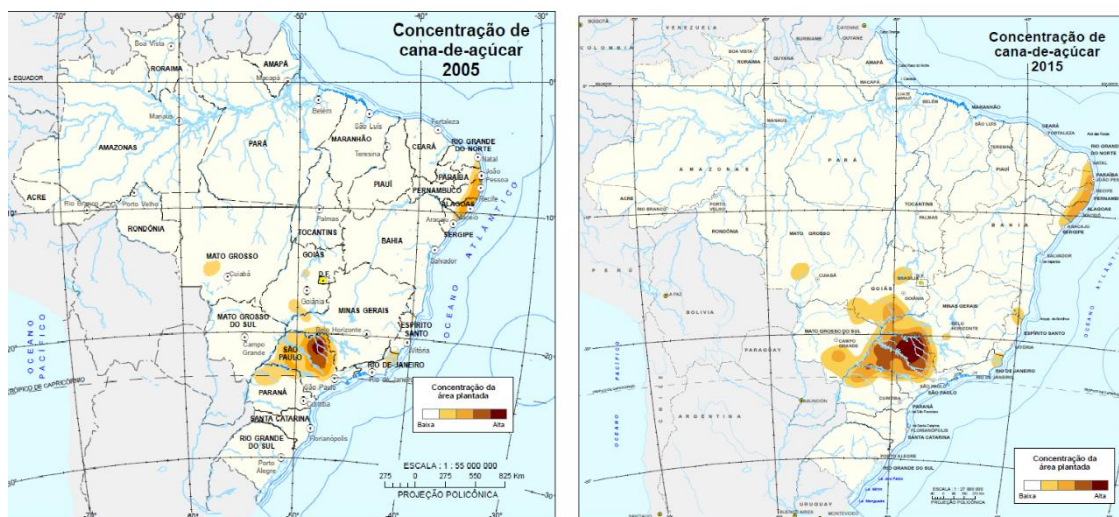


Figura 1: Figura da concentração de áreas cultivadas com cana de açúcar entre os anos de 2005 e 2015, com a variação da concentração sendo representada entre o branco (mais baixo) e entre as tonalidades de marrom, indo até o marrom escuro (mais alta). Fonte: IBGE (2018).

Já o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) traz uma projeção da oferta e demanda de etanol carburante (hidratado e anidro) para o período de 2016 a 2026, no qual é previsto um aumento de 52% da produção e um aumento da área plantada com

cana-de-açúcar para este fim de aproximadamente 0.8 milhões de hectares (EPE, 2017). Com base nas projeções do aumento territorial para o cultivo da cana-de-açúcar, alguns estudos analisam as possíveis regiões de expansão, como nos trabalhos feitos por SPAROVEK *et al.* (2009), apresentados na Figura (2), e por RIBEIRO *et al.* (2016); NIPE-UNICAMP, IBGE & CTC *apud* UNICA (2016).

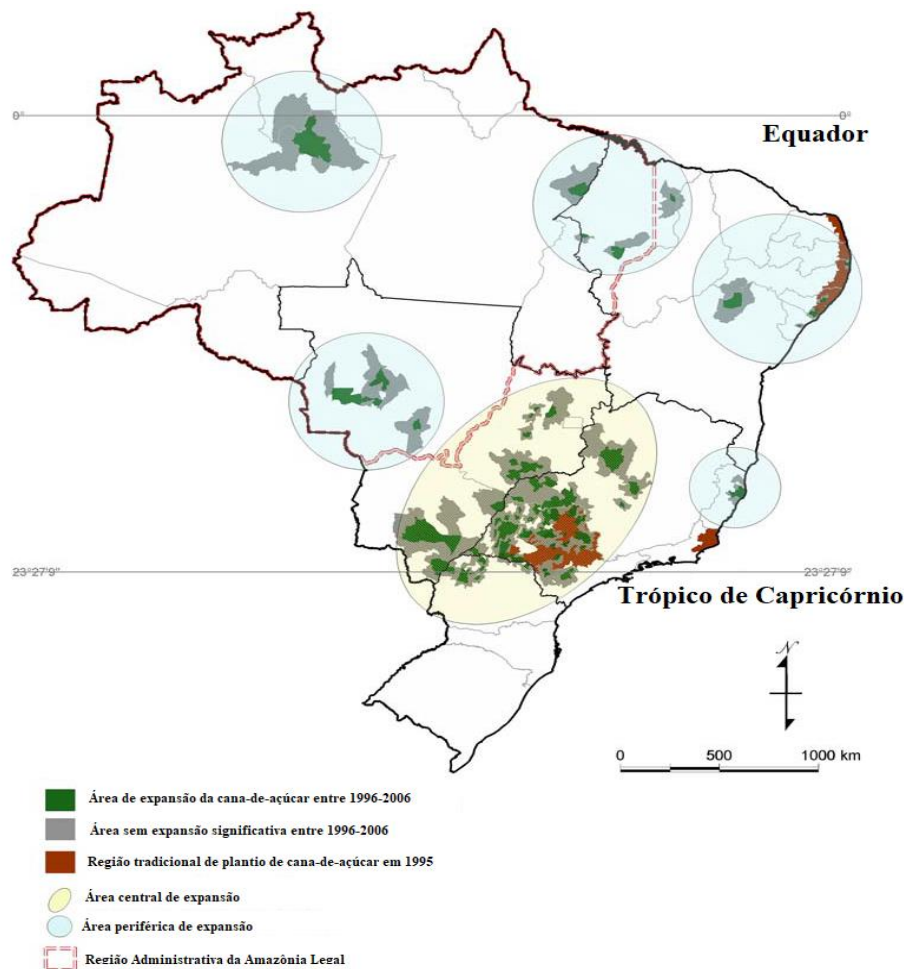


Figura 2: Área de expansão da cana-de-açúcar, áreas prospectada (círculos em amarelo), áreas periféricas prospectadas para o cultivo de cana-de-açúcar (círculos em azul), áreas que sofreram expansão do cultivo da cana entre os anos de 1996 e 2006 (hachurado em verde) e áreas sem expansão significativa entre os anos de 1996-2006 (hachurado em cinza). Fonte: Adaptado de (SPAROVEK *et al.*, 2009).

Do ponto de vista da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil, vale ressaltar que a Bacia hidrográfica do rio Paranaíba é um dos *hotspots* da expansão da cana-de-açúcar, seja em termos da expansão ocorrida nestes últimos anos como mostrado na Figura (3) ou em termos do que está sendo prospectado, como apontado nos trabalhos feitos por SILVA & MIZIARA (2011); RIBEIRO *et al.* (2016); NIPE-UNICAMP, IBGE & CTC *apud* UNICA (2016); IBGE (2018).

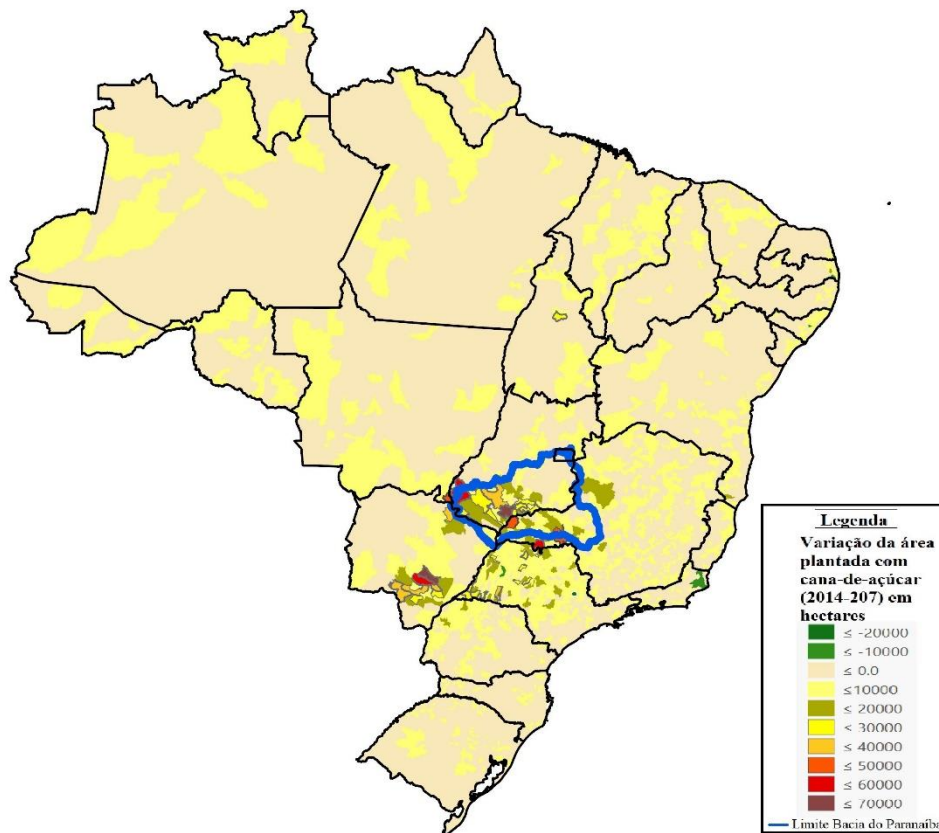


Figura 3: Representação da variação da área plantada com cana-de-açúcar entre os anos de 2007 e 2014 no Brasil, mostrando as áreas com o aumento do uso do solo para o cultivo de cana-de-açúcar (em cores quentes), áreas com a diminuição do uso do solo para o cultivo da cana (em tons de verde) e áreas em que não houve mudança do uso do solo em relação ao cultivo da cana-de-açúcar (em bege). A localização da Bacia hidrográfica do rio Paranaíba no Brasil (contorno em azul) e a localização de todas as Unidades da Federação (contorno preto). Fonte: Elaboração própria, utilizando sistema de informação geográfica, com base nos dados da ANA (2018); IBGE (2018).

Sabendo que a agricultura é dependente das condições climáticas, na qual os elementos meteorológicos afetam não só os processos metabólicos das plantas diretamente relacionados à produção vegetal, mas também as mais diversas atividades no campo, como mostrado por FAGERIA (1992); GOMMES *et al.* (2010), torna-se estratégico o desenvolvimento de ferramentas de análise mais precisas, que permitam gerenciar a expansão do plantio de forma sustentável. Uma vez que esta produção apresenta implicações importantes relacionadas à proteção do meio ambiente, à criação de empregos, à SAEH, entre outras, como observado por GOLDEMBERG (2004).

Além disto, tais ferramentas podem ser utilizadas como auxílio à minimização de barreiras protecionistas de cunho ambiental que sejam desfavoráveis à exportação de etanol (NEVES e CONEJERO, 2007).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral:

- (1) Avaliar as possibilidades de expansão da cana-de-açúcar, sobre a região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, traçando cenários que apresentem um menor impacto ambiental e uma maior produtividade potencial desse cultivo, através do zoneamento de aptidão agroclimática (ZAPAC) da cana-de-açúcar, frente aos cenários climatológico e de mudanças climáticas.

Tendo como objetivos específicos:

- (i) Modificar uma equação de evapotranspiração dentro do DSSAT/CANEGRO 4.5, impactando o resultado da modelagem, resultando assim, na criação de uma ferramenta mais completa, inovadora, e que se aproxime com maior acurácia à realidade, voltada para o clima da região estudada;
- (ii) Utilizar cenários histórico e futuro mais detalhados, com a utilização de produtos de advindos do *downscaling dinâmico*, feito com o modelo RegCM4, de dois modelos do CMIP5⁴/IPCC (ESM2M⁵ do GFDL⁶ e o MPI⁷-ESM-MR⁸) e parametrizações próprias para o cenário da região.
- (iii) Elaborar um ZAPAC mais consubstanciado, através do cumprimento do objetivo (i) e (ii).
- (iv) Analisar o grau de melhoria que o produto final disponibilizado por esta pesquisa pode trazer, por meio da comparação com o resultado obtido no trabalho de TAYT-SOHN *et al.* (2018).

Para atingir tais objetivos, a metodologia seguiu a sequência de eventos explicitada pela Figura (4).

⁴ CMIP5: *Coupled Model Intercomparison Project 5*, Projeto iniciado em 2008 e, com a participação de grupos internacionais de pesquisa em modelagem climática, tem como objetivo a pesquisa sobre a modelagem climática em diferentes escalas e graus de complexidade, com troca de informações e conhecimentos entre esses grupos. Essa comunidade científica desenvolve a modelagem e provém os resultados e conhecimentos da modelagem climática às análises do IPCC (TAYLOR *et al.*, 2012).

⁵ ESM2M - *Earth System Model 2M*.

⁶ GFDL - *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*.

⁷ MPI - *Max-Planck-Institut für Meteorologie*.

⁸ ESM-LR - *Earth System Models Low Resolution*.

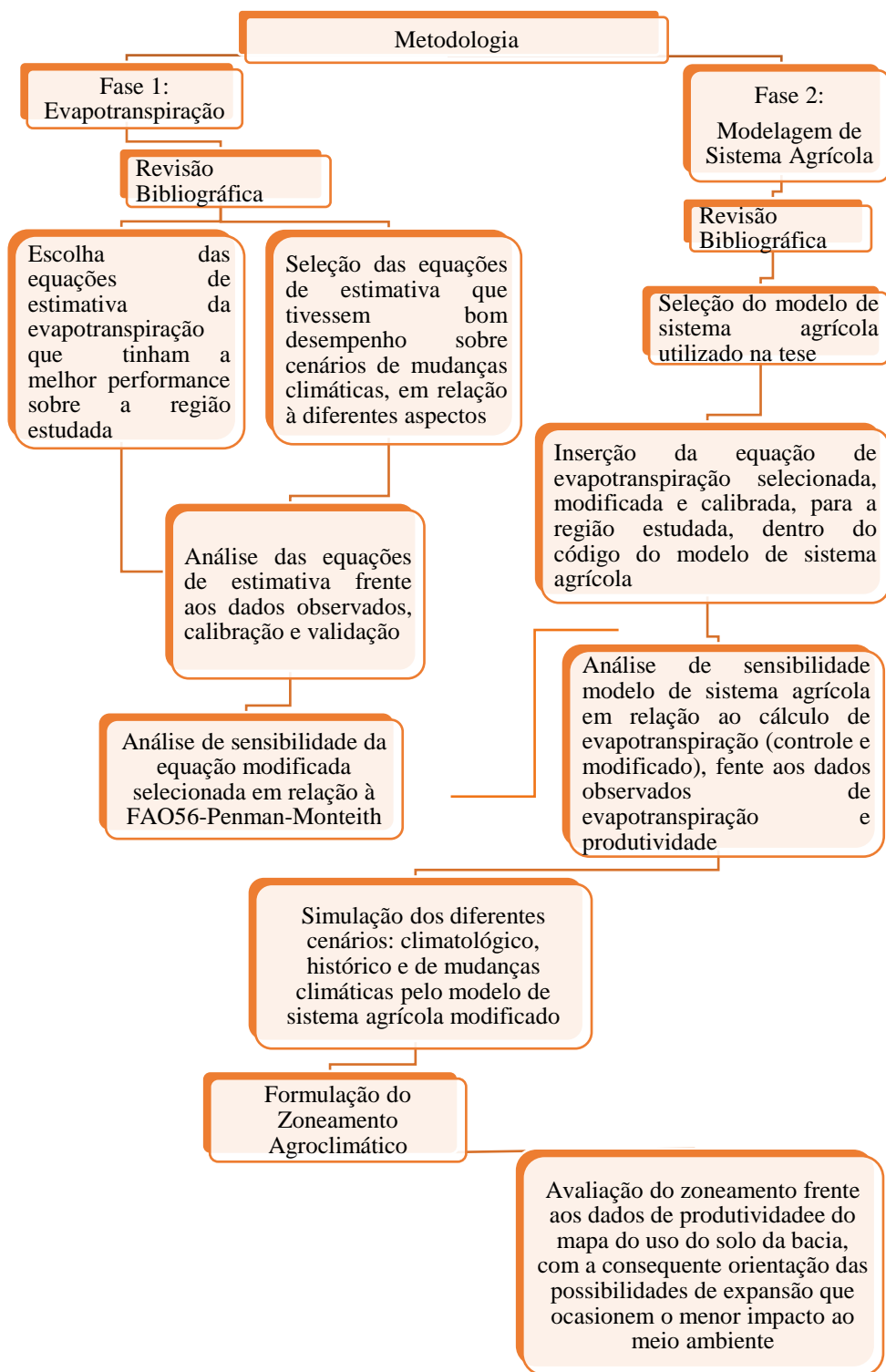


Figura 4: Sequência de eventos da metodologia aplicada na tese. Fonte: Elaboração própria.

1.2 Estrutura da Tese

Para se alcançar o objetivo geral desta tese, descrito na introdução, foi necessária a realização de uma revisão bibliográfica à luz dos temas que são tidos como ferramentas auxiliaadoras na formulação do ZAPAC, sendo a necessidade hídrica componente fundamental da modelagem agrícola, que é considerada uma ferramenta importante para formulação do ZAPAC.

A tese foi dividida em sete capítulos:

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO: A introdução retrata de forma sucinta toda a temática abordada na tese, explicando as motivações do estudo, as problemáticas encontradas e a metodologia adotada para mitigar ou solucionar partes desta problemática.

CAPÍTULO II – RELAÇÃO ENTRE A NECESSIDADE HÍDRICA E A PRODUTIVIDADE: Nesse capítulo é descrito como a necessidade hídrica influencia a produção de uma determinada cultura e aponta a importância do cálculo da evapotranspiração nessa questão, com a apresentação de metodologias de cálculo da evapotranspiração.

CAPÍTULO III – MODELAGEM AGRÍCOLA: Nesse capítulo é explicada a função da modelagem de sistema agrícola, contando sua história e descrevendo os principais modelos de sistema agrícola em voga no meio acadêmico e apontando as metodologias de cálculo da evapotranspiração dentro dos códigos desses modelos. O capítulo é finalizado com as premissas utilizadas para a escolha do modelo aplicado na tese.

CAPÍTULO IV – ZONEAMENTO COMO FERRAMENTA DO PLANEJAMENTO TERRITORIAL: Nesse capítulo é descrito o conceito do zoneamento com a apresentação dos principais zoneamentos existentes e suas respectivas definições. Ademais, é feita uma análise do zoneamento voltado para a agricultura e áreas de expansão, corroborando a importância do zoneamento confeccionado nesta tese também para cenários de mudanças climáticas. Após a revisão foi sinalizada a escolha do tipo de zoneamento empregado na tese.

CAPÍTULO V – MATERIAIS E MÉTODOS: Nesse capítulo é feita uma breve análise da área de estudo e o cultivo estudado. Após isso todo o levantamento de dados

é exposto e justificado. Sendo assim, o capítulo é finalizado com a exposição de todos os métodos aplicados e utilizados até a formulação e avaliação do zoneamento aplicado.

CAPÍTULO VI – RESULTADOS E DISCUSSÕES : Nesse capítulo é feita a avaliação do método empregado, para posterior descrição e análise dos mapas formulados a partir desse método para as variáveis de produtividade da cana-de-açúcar e necessidade hídrica, além dos mapas da temperatura média anual que advém do modelo regionalizado. Em seguida, são apresentados os mapas que compõem o zoneamento e suas respectivas descrições e avaliações. Por fim, é apresentada a discussão sobre as principais áreas de expansão e a avaliação das áreas em que a expansão pode ocorrer causando o menor impacto possível ao meio ambiente.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES: Nesse Capítulo são apresentadas as principais conclusões da tese acerca do novo método implementado dentro do modelo de sistema agrícola, bem como sobre o zoneamento e as principais estratégias sugeridas à expansão da cana-de-açúcar, de forma a ocasionar o menor impacto possível ao meio ambiente.

CAPÍTULO II

2. RELAÇÃO ENTRE A NECESSIDADE HÍDRICA E A PRODUTIVIDADE

De acordo com DOOREMBOS & PRUITT (1978), a relação que existe entre o cultivo, o clima, a água e o solo é complexa, existem diversos processos de cunho biológico, químico, físico e fisiológico que estão envolvidos nesta relação.

O déficit hídrico (DEF), por exemplo, pode influenciar importantes processos que determinam a taxa de crescimento das plantas, dependendo da intensidade e duração (FISCHER & HAGAN, 1965; CHAVES, 1991). O DEF pode ocasionar o fechamento dos estômatos⁹, sendo a estrutura estomática e seus processos descritos por LANGE *et al.* (1971); SCHULZE *et al.* (1972); KRIEDMANN *et al.* (1975); GOLLAN *et al.* (1986). Tal fechamento contribui para a diminuição das perdas de vapor d'água pela planta em detrimento da fotossíntese (KAISER, 1987; MARTIN & RUIZ-TORRES, 1992).

Além disso, o DEF pode ocasionar a diminuição da taxa de crescimento da área foliar, influenciar o alongamento radicular e interferir na produtividade (FISCHER & HAGAN, 1965; HSIAO, 1973; HOFFMAN *et al.*, 1990).

A relação entre a necessidade hídrica e a produtividade, por exemplo, já é estudada há bastante tempo, sendo o estudo desenvolvido por de DE WIT (1950) um dos pioneiros o tema.

Essa interação entre o DEF e o crescimento/produtividade de um determinado cultivo foi analisada também por JENSEN (1968) e DOOREMBOS & PRUITT (1978). Eles propuseram equações que estimam a relação entre a produtividade e o suprimento de água.

⁹ O estômato é uma estrutura que se localiza na epiderme das plantas em sua parte aérea, como por exemplo, nas folhas, nos caules, e em algumas plantas até mesmo nas raízes. Essa estrutura é constituída de um par de células especializadas, conhecidas como células guarda, que de acordo com as variações do meio ambiente se abrem e se fecham. Sua maior função é fazer o controle das trocas gasosas, otimizando a fotossíntese pelo controle de CO₂, além de auxiliar na manutenção hídrica da planta, sendo uma estrutura que possui alta capacidade adaptativa às adversidades (WILMER & FRICKER, 1996; HETHERINGTON & WOODWARD, 2003).

A equação proposta por JENSEN (1968) envolve vários estádios fenológicos¹⁰ e é expressa pela Equação (1).

$$Y_a/Y_m = \prod_{i=1}^N (ET_a/ET_m)^{\lambda_i} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que: Y_a corresponde à produtividade atual ou produtividade real [Kg/ha], Y_m é a produtividade máxima que o cultivo estudado pode ter naquele determinado local em condições ótimas para a cultura [Kg/ha]; N é o número de estádios fenológicos do cultivo estudado [adimensional]; ET_a é a evapotranspiração atual [mm/dia]; ET_m é a evapotranspiração máxima [mm/dia]; e λ_i é o índice de sensibilidade do cultivo estudado ao estresse hídrico durante o i ésimo estágio fenológico [adimensional].

DOOREMBOS & PRUIT (1978) desenvolveram uma relação matemática em que o DEF é diretamente linear à produtividade. Por meio do cálculo da razão entre as estimativas da evapotranspiração atual e máxima é factível a mensuração das necessidades hídricas da planta e o impacto dessa necessidade sobre a produtividade, como mostrado pela Equação (2).

$$1 - Y_a/Y_m = K_y * (1 - ET_a/ET_m) \quad \text{Equação (2)}$$

Em que: Y_a corresponde à produtividade atual ou produtividade observada [Kg/ha], Y_m é a produtividade máxima que o cultivo estudado pode ter naquele determinado local em condições ótimas para a cultura [Kg/ha]; K_y ¹¹ fator de resposta da produtividade [adimensional]; ET_a evapotranspiração atual [mm/dia]; ET_m evapotranspiração máxima [mm/dia].

Assim, é possível observar tanto pela abordagem qualitativa quanto pela quantitativa que a estimativa da necessidade hídrica é de grande importância, pois impacta diretamente no desenvolvimento de um determinado cultivo, mas não se limita a isso, impactando toda a cadeia de consumo hídrico, tendo em vista de que 70% da água consumida no planeta é destinada ao setor agrícola, o qual necessita cada vez mais de água em seus sistemas de produção, já que possui um crescimento de retirada da água nesse setor de 1.1% ao ano entre os anos de 1970 e 2010 (FAO, 2018).

¹⁰ Apesar da definição de estádios fenológicos variar, a versão dada por NPN (2018) define que estádios fenológicos são estágios de desenvolvimento que ocorrem em uma planta, o perfilhamento na cana de açúcar e a germinação são exemplos de estádios fenológicos (NPN, 2018; GASHO, 1985).

¹¹ O coeficiente K_y varia de cultura para cultura sendo que para valores maiores que 1 a cultura é muito sensível ao déficit hídrico, menores que 1 mais resistentes ao déficit hídrico e igual a 1 o grau de déficit hídrico é diretamente proporcional ao grau de diminuição da produtividade. O valor de K_y para a cana-de-açúcar é igual a 1.2 (STEDUTO *et al.*, 2012)

Levando em consideração que a necessidade hídrica da planta é um critério irrevogável à irrigação, parece lógico que a condição hídrica no tecido da planta possa ser considerada como um excelente preditor quantitativo à irrigação (TAYLOR & GAYLEN, 1972, tradução nossa).

A necessidade hídrica de uma cultura pode ser estimada através do cálculo da evapotranspiração, como apontado por (DOORENBOS, 1975; ALLEN *et al.*, 1998; JESEN & ALLEN, 2016).

Alguns estudos mostram a importância da evapotranspiração para diversos tipos de avaliação, inclusive para as simulações de impacto das mudanças climáticas em diversas áreas como no ciclo hidrológico e no ciclo do gás carbônico, assim como na agricultura (SHUKLA & MINTZ, 1982; SHUKLA *et al.*, 1990; SAU *et al.*, 2004; SENEVIRATNE, 2010; DEJONGE *et al.*, 2012).

2.1 A Evapotranspiração

Os estudos sobre a evapotranspiração foram evoluindo no decorrer dos últimos dois séculos. Na pesquisa feita por DALTON, (1802) *apud* BRUTSAERT, (1982) foi observada uma relação entre a evaporação natural e o déficit de pressão de vapor, sendo essa uma relação teórica que só foi equacionada anos mais tarde. Já TRANSEAU (1905) desenvolveu uma pesquisa para fazer o mapeamento das florestas do Norte dos Estados Unidos, em que a razão entre a precipitação e a evaporação era utilizada como premissa do mapeamento, e a evapotranspiração era a ideia base para a formulação dessa razão. Entretanto, o conceito de evapotranspiração só foi definido quatro décadas mais tarde.

Foi durante a década de 40 que o conceito de evapotranspiração foi definido por WILM & THORNTHWAITE (1944), posteriormente os trabalhos de THORNTHWAITE (1948) e PENMAN (1948) trouxeram importantes considerações sobre a temática com seus métodos de estimativa da evapotranspiração.

A evapotranspiração pode ser definida como o resultado do somatório de dois processos que ocorrem na natureza de forma quase sempre simultânea: a evaporação da água na superfície do solo e a transpiração pelas plantas (ALLEN *et al.*, 1998).

A evaporação é um processo físico-químico que ocorre quando a água muda do estado líquido para o estado de vapor (vaporização) de uma superfície de evaporação,

sendo esta mudança endotérmica, ou seja, uma mudança de estado que necessita de energia para ocorrer (CLAUSIUS, 1850; WIESNER, 1970).

De acordo com ALLEN *et al.* (1998), no caso da evaporação do solo e da superfície das plantas tal energia é fornecida pela radiação solar e, em menor quantidade, pela temperatura ar. Sendo que, as principais forçantes meteorológicas que contribuem com o processo evaporativo são a umidade do ar, a temperatura do ar na superfície, o vento e a radiação solar.

No caso da transpiração, ela está relacionada a processos físico-químicos e biológicos, em que a planta perde água de seus tecidos na forma de vapor para a atmosfera e, toda a parte aérea da planta pode perder algum conteúdo de água, mas a maior parte da perda dá-se pelas folhas (JENSEN, 1968).

Levando em consideração os diferentes conceitos existentes, a evapotranspiração pode sofrer variações em sua nomenclatura, entre elas estão: a evapotranspiração potencial, a evapotranspiração de referência, a evapotranspiração real ou atual e a evapotranspiração da cultura.

2.1.1 A Evapotranspiração Potencial

O conceito de evapotranspiração potencial foi baseado nas mais diversas áreas como hidrologia, geografia, climatologia etc., com o intuito de achar uma definição para a aridez (GUYOT, 1998).

A evapotranspiração potencial (ETp) foi conceituada por WILM & THORNTHWAITE (1944), sendo definida como uma determinada quantidade de água que evapora para a atmosfera em condições em que não há restrições hídricas à vegetação. A evapotranspiração atende, assim, apenas a demanda de vapor d'água feita pela atmosfera.

De acordo com GRANGER (1989), existem cinco definições para a ETp, sendo que uma segunda definição que pode ser citada foi proposta por DINGMAN (1992):

A evapotranspiração potencial é a taxa cuja evapotranspiração poderia ocorrer de uma grande área coberta de forma uniforme e completa com vegetação em crescimento, a qual tem acesso ilimitado de água no solo, sem advecção de calor ou sem a ação de efeitos de aquecimento.

A ETp é utilizada em muitos trabalhos, seja em modelos hidrológicos, ou em modelos de sistemas terrestres e modelos agrícolas, e.g. HAY & MCCABE (2002); MCCABE & MARKSTROM (2007).

2.1.2 Evapotranspiração de Referência

De acordo com ALLEN *et al.* (1998), a evapotranspiração de referência é conceituada como a taxa de evapotranspiração de uma superfície hipotética de referência, para um cultivo com altura fixa de 0.12 m, possuindo uma resistência fixa de 70 s.m^{-1} e um albedo de 0.23, com disponibilidade hídrica no solo para atender todas as demandas da planta. Tal planta hipotética encontra-se sempre em uma fase fixa de crescimento, sendo assim o fenômeno de evapotranspiração somente é susceptível à variação relacionada às demandas feitas pela atmosfera.

Ainda de acordo com ALLEN *et al.* (1998), vale ressaltar que essa superfície hipotética possui similaridade com uma superfície coberta de grama, que possui altura uniforme e está sempre em fase de crescimento, sombreando por completo o solo e tendo água disponível para atender a todas as necessidades hídricas da planta.

Com intuito de não haver ambiguidades, muitos autores citam as diferenças entre a evapotranspiração potencial e de referência KATERJI & PERRIER (1983); YATES & STRZEPEK (1994); IRMAK & HAMA (2003); MCMAHON *et al.* (2013); MOENE & VAN DAM (2014), outros ainda recomendam que não seja utilizado o termo evapotranspiração potencial para fazer alusão à evapotranspiração de referência, como fortemente recomendado por ALLEN *et al.* (1998), e ainda há aqueles trabalhos que citam a confusão que ocorre em relação a esses dois conceitos como LU *et al.* (2005); NOKES (1995); MOENE & VAN DAM (2014).

2.1.3 Evapotranspiração Atual ou Real

A evapotranspiração atual ou real representa a taxa real de evapotranspiração das plantas e do solo, de acordo com a disponibilidade hídrica do solo (JENSEN, 1990).

2.1.4 Evapotranspiração da Cultura

A evapotranspiração da cultura pode ser definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura específica, na qual a evapotranspiração de referência é multiplicada pelo coeficiente da cultura estudada. A evapotranspiração da cultura

varia de acordo com o estágio fenológico, com a quantidade de água disponível no solo, com a frequência em que o solo está úmido, com a gestão agrícola, com as condições do ambiente e a com variedade (ALLEN *et al.*, 1998; TEIXEIRA *et al.*, 1999; ALLEN *et al.*, 2007)

2.2 Métodos de Cálculo da Evapotranspiração

Muitos estudos sobre a evapotranspiração foram feitos, com formulação de inúmeras equações específicas para a estimativa deste fenômeno, dentre elas estão as equações: (1) do método de balanço de energia-razão de Bowen, (2) de Thornthwaite, (3) de Penman, (4) de Turc, (5) de Makkink, (6) de Blaney e Cridle, (7) de Priestley e Taylor, (8) de Camargo, (9) de Penman – Monteith, (10) de Hargreaves & Samani, (11) de Stanghellini, (12) da Radiação Solar.

2.2.1 A Equação do Balanço de Energia-Razão de Bowen

Como citado por LOURENCE & PRUITT (1971) e ALLEN *et al.* (1994), uma das maneiras mais simples de se calcular a evapotranspiração é através da razão de Bowen.

Esta razão foi desenvolvida por BOWEN (1926), cujo trabalho resultou na criação de uma equação para trazer respostas aos fluxos de energia. Essa equação está expressa pela Equação (3) e é definida como a razão entre o fluxo de calor sensível e latente (OKE, 1987; STULL, 1988; ARYA, 2001).

$$\beta = H/LE \quad \text{Equação (3)}$$

Em que: H é igual ao fluxo de calor sensível [Wm^{-2}] e LE se refere ao fluxo de calor latente [W m^{-2}].

Levando em consideração as equações do gradiente de temperatura potencial e da umidade específica desenvolvidas por DYER (1974) (não mostradas), a equação da razão de Bowen pode ser expressa pela Equação (4).

$$\beta = \left(-\rho * C_p * K_H * \frac{\partial T}{\partial z} \right) / \left((-\rho * \varepsilon * \lambda * K_w) / P \right) * \partial e / \partial z \quad \text{Equação (4)}$$

Em que: ρ é igual a densidade do ar [kg m^{-3}]; C_p é igual ao calor específico do ar à pressão constante [$\text{J Kg}^{-1}\text{C}^{-1}$]; K_H é o coeficiente de difusão turbulenta para o calor sensível [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]; K_w é o coeficiente de difusão turbulenta para o vapor d'água [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]; T

é a temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$]; z é a altura na qual se faz a medição, sendo que são duas medições devido a variação; ε constante que denota a razão entre o peso molecular da água e o peso molecular do ar seco (0.622); λ é o calor latente de vaporização [J Kg^{-1}]; K_w é o coeficiente de difusão turbulenta para o vapor d'água [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]; P é a pressão atmosférica [KPa]; e e é a pressão de vapor [KPa].

Levando em consideração a hipótese de similaridade, e.g. a analogia de Reynold, em que $K_h = K_w$ na ausência de advecção de calor sensível, regional ou local, e em condição de instabilidade atmosférica, (DYER, 1967; DYER, 1974; DYER & HICKS, 1970, VERMA *et al.*, 1978); é possível aproximar a equação de Bowen à seguinte Equação (5).

$$\beta = \gamma * (H/LE) \quad \text{Equação (5)}$$

Em que: γ é o coeficiente psicrométrico [$\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], H é igual ao fluxo de calor sensível [W m^{-2}]; e LE se refere ao fluxo de calor latente [W m^{-2}].

Substituindo os parâmetros da Equação (5) dentro da equação do balanço de energia, Equação (6), chega-se à Equação (7).

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad \text{Equação (6)}$$

$$LE = (R_n + G)/(1 + \beta) \quad \text{Equação (7)}$$

Em que: R_n é o balanço de radiação [W m^{-2}], H é igual ao fluxo de calor sensível [W m^{-2}], LE se refere ao fluxo de calor latente [W m^{-2}]; G fluxo de calor no solo [W m^{-2}]; e β é a razão de Bowen [adimensional].

Por meio do fluxo de calor latente é possível fazer estimativas da evapotranspiração, representada pela Equação (7). Sendo essa abordagem metodológica conhecida como o método do balanço de energia-razão de Bowen, muitos trabalhos mensuraram a acurácia deste método, como TANNER (1960); FRITSCHEN (1965); BLAD & ROSEMBERG (1974); TODD *et al.*, (2000); GAVILÁN & BERENGENA (2007).

Além disso, muitas equações de cunho empírico que estimam a evapotranspiração, se basearam no método de balanço de energia-razão de Bowen, como por exemplo, as equações dos trabalhos de PNEMAN (1948); PENMAN (1963), JENSEN (1967).

O ponto mais favorável desse método dá-se por meio da sua habilidade em calcular os fluxos turbulentos sem valores absolutos dos vórtices de difusividade. Apesar disso, muitos trabalhos apontam também para as limitações deste método, dentre as limitações estão: (1) Erros intrínsecos ao fluxo de energia e aos fluxos de superfície, que são erros que se propagam e interferem no resultado final de estimativa da evapotranspiração; (2) Problemas com a convenção de sinais dos fluxos turbulentos, como por exemplo relacionados à evaporação e à condensação, que podem prejudicar o resultado final; e (3) Problemas com a acurácia dos valores dos fluxos, que também podem contribuir para gerar resultados errados, mesmo diante da convenção dos sinais estar correta (OHMURA, 1982; ANGUS & WATTS, 1984; ALLEN *et. al*, 1994).

2.2.2 A Equação de Thornthwaite

Em 1948, por meio do empirismo e apenas fazendo uso de elementos meteorológicos, Thornthwaite desenvolveu uma equação para estimar a evapotranspiração. Seu modelo é amplamente utilizado na formulação do balanço hídrico, auxiliando na avaliação das condições climáticas de um determinado local, como mostrado em seu próprio trabalho (THORNTHWAITE, 1948; FEDDEMA, 2005).

A equação desenvolvida por esse cientista, e que foi batizada com seu nome, pode ser visualizada na Equação (8). Tal equação relaciona a temperatura mensal com a evapotranspiração potencial para um período padrão de um mês com 30 dias e com os dias tendo a possibilidade de possuir 12 horas de brilho solar, sendo assim um método com base na temperatura (THORNTHWAITE, 1948).

$$PET = 1.6 * C * (10 * T/I)^a \quad \text{Equação (8)}$$

$$C = N/12 * D/30 \quad \text{Equação (9)}$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i \quad \text{Equação (10)}$$

$$i = (T/5)^{1.1514} \quad \text{Equação (11)}$$

$$a = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.7 * 10^{-2}I + 0.49 \quad \text{Equação (12)}$$

Em que: PET é a evapotranspiração [cm]; C é o comprimento do dia, no qual tempo decorrido entre o nascer e o pôr do sol é um múltiplo de 12 horas [adimensional];

N é a insolação máxima diária, em função da latitude e época do ano [h]; D é o número de dias do mês estudado [dias]; T é a temperatura do ar média mensal [$^{\circ}\text{C}$]; I é o coeficiente de aquecimento anual [adimensional]; i é o coeficiente de aquecimento mensal [adimensional]; e a é um coeficiente de ajuste que varia de acordo com o local [adimensional].

Como mencionado por PEREIRA & CAMARGO (1989), a definição sobre o tamanho da área com vegetação ficou deficitária, sendo esse problema e a importância dessa definição reconhecidos pelo próprio Thornthwaite em 1954 (THORNTHWAIT, 1954). Dois anos mais tarde, PENMAN (1956) definiu o tamanho da área de acordo com sua amplitude de alcance, variando entre uma região na qual a evapotranspiração potencial ocorreria sem “interferência”, que seria no meio do oceano, e em uma região com muita “interferência”, que seria no meio do deserto.

Como mencionado por ALKAEED *et al.* (2006); BEGUERÍA *et al.* (2010) e avaliado por AHMADI & FOOLADMAND (2007), o método de Thornthwaite tem como uma das suas maiores vantagens a baixa quantidade de dados meteorológicos demandados para o cálculo de evapotranspiração. Por conta da evapotranspiração de Thornthwaite ser função da temperatura média mensal, ROUNSEVELL & BRIGNALL (1994), corroboram o uso dessa equação para avaliações feitas sob o efeito de cenários das mudanças climáticas.

Apesar disso, essa mesma equação apresenta também desvantagens PELTON *et al.* (1960); VAN WIJK & DE VRIES (1954) citam que existem locais, latitudes médias e altas, onde em diferentes estações do ano observa-se a mesma temperatura, mas diferentes valores de radiação solar, o que também afeta o valor final da evapotranspiração. Mas, a equação de Thornthwaite não é sensível a esta variação. Adicionalmente, PRUITT (1964); DOOREMBOS & PRUITT (1977) mostram que, para regiões de clima árido e semiárido, a equação de Thornthwaite não apresenta resultados satisfatórios quando comparados ao valor real da evapotranspiração. E CAMARGO & CAMARGO (2000) citam que para climas super-úmidos a equação de Thornthwaite também não apresenta bons resultados.

2.2.3 A Equação de Penman

A equação desenvolvida por Penman, no final da década de 40, é uma equação semi- experimental em função do balanço de energia e da transferência de massa

(equações da aerodinâmica), e tem como finalidade o cálculo da evapotranspiração. Na época, o termo evapotranspiração ainda não era aceito por toda a comunidade científica e Penman, em seu trabalho, menciona que a equação desenvolvida por ele é para o cálculo da evaporação natural (PENMAN, 1948). Posteriormente, esse cientista também vai adotar o termo evapotranspiração em seus trabalhos.

De acordo com ALLEN (1986), essa equação sofreu algumas modificações e evoluções, sendo representada pela Equação (13).

$$E_0 = (\Delta/(\gamma + \Delta)) * (R_n - G) + (\gamma/(\Delta + \gamma)) * E_a \quad \text{Equação (13)}$$

Em que: E_0 é a evaporação natural ou evapotranspiração [mm dia^{-1}], Δ é a curva de saturação da pressão de vapor em função da curva da temperatura média do ar [mb K^{-1}], γ é a constante psicrométrica [mb K^{-1}], R_n é o balanço de radiação [$\text{mm/dia de água equivalente}$], G é o fluxo de calor no solo [mm dia^{-1}] e E_a é o termo aerodinâmico de transporte de vapor [mm/dia].

Uma das suas principais desvantagens é a quantidade de dados meteorológicos demandados, ademais em dias com ventos muito fortes as estimativas podem subestimar o valor real da evapotranspiração (STEPHENS & STEWART, 1963; GOYAL, 2013). De acordo com SHIAU & DAVAR (1973), ainda vale ressaltar que esta equação deve ser levada com cuidado quando utilizada em regiões áridas devido à falta de parâmetros sensíveis à advecção.

Apesar de suas desvantagens, SHIAU & DAVAR (1973) citam que uma das suas principais vantagens ocorre na área de estudos climáticos, pois a maioria das variáveis demandadas por esta equação são variáveis climáticas do tipo padrão.

2.2.4 A Equação de Turc

A equação de estimativa de evapotranspiração desenvolvida por TURC (1961), foi criada para as regiões do Sul da França e Norte da África. Sendo esse, definido por ALLEN *et al.* (2003) como um dos modelos operacionais de cálculo da evapotranspiração.

A equação de Turc é uma equação que combina temperatura, umidade relativa e radiação solar, sendo ela passível de ser calculada na base diária. Vale ressaltar que a metodologia desenvolvida por TURC (1961) é condicionada à variação da umidade relativa, como mostrado na Equação (14) e Equação (15).

Quando $UR \geq 50\%$,

$$ET_0 = 0.0133 * (T_m / (T_m + 15)) * (R_s + 50) \quad \text{Equação (14)}$$

Quando $UR < 50\%$,

$$ET_0 = 0.0133 * (T_m / (T_m + 15)) * (R_s + 50) * (1 + (50 - UR/70)) \quad \text{Equação (15)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência [$\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$], T_m é a temperatura média diária [$^{\circ}\text{C}$], R_s é a radiação de onda curta que chega na superfície [mm dia^{-1}], e UR é a umidade relativa [%].

De acordo com LU *et al.* (2005), esta equação juntamente com Priestley & Taylor é uma das poucas equações que possui uma boa performance em climas úmidos e quentes, como é o caso do clima da região Sudeste dos Estados Unidos. Além disso, esse mesmo trabalho cita que para escalas de tamanho igual ao de uma bacia hidrográfica equações como a de Turc e Priestley & Taylor se sobressaem perante as equações de Makink, Thornthwaite e Hargreaves-Samani.

De acordo com JENSEN *et al.* (1990), uma das vantagens da equação de Turc é que ela é uma das equações mais simples e empiricamente mais acuradas dentre as que são utilizadas para estimar a evapotranspiração de referência sobre condições de clima úmido.

Uma das principais desvantagens deste método é que ele não apresenta bons resultados para temperaturas abaixo de 0°C (XU & SINGH, 2000; DVWK, 1996 *apud* WEIB & MENZEL, 2008).

2.2.5 A Equação de Makink

A equação desenvolvida por MAKINK (1957) e que leva seu nome, é uma equação que deriva da equação de Penman e uma versão simplificada da de Priestley & Taylor, sendo um método baseado na radiação, que foi obtido através do empirismo utilizando para tanto um lisímetro de lençol freático. Esse método tem como seu principal objetivo o cálculo da evapotranspiração da grama. A equação não leva em consideração o termo aerodinâmico e substitui o balanço de radiação solar que existe na equação de Priestley & Taylor pela variável de radiação solar global, sendo representada pela Equação (16).

$$ET_0 = 0.61 * (\Delta/(\Delta + \gamma)) * (R_s/\lambda) - 0.12 \quad \text{Equação (16)}$$

Em 1984, Hansen propôs uma modificação na formula, como observado na Equação (17), (HANSEN, 1984).

$$ET_0 = 0.7 * (\Delta/(\Delta + \gamma)) * (R_s/\lambda) \quad \text{Equação (17)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}]; R_s é a radiação solar [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$], Δ é a curva de saturação da pressão de vapor [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]; γ é a constante psicrométrica [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]; e λ é o calor latente de vaporização, normalmente tido como aproximadamente igual a $2.45 [\text{MJ Kg}^{-1}]$.

Uma das principais vantagens do método de Makkink é a de necessitar de poucas variáveis meteorológicas para estimar a evapotranspiração, e de possuir bons resultados em climas úmidos (ROSEMBERG *et al.*, 1983; DOUGLAS *et al.*, 2009a; ZHAO *et al.*, 2013).

Uma das desvantagens desse método é que ele subestima a evapotranspiração em locais áridos e costuma apresentar resultados mais realístico quando há grande disponibilidade de radiação solar (TABARI, 2010).

2.2.6 A Equação de Blaney-Criddle

A formula desenvolvida por Blaney e Criddle é baseada na temperatura, sendo desenvolvida para a região Oeste dos Estados Unidos da América, entre o Novo México e o Texas, que possui clima semiárido (BLANEY & CRIDDLE, 1950).

De acordo com DOOREMBOS & PRUITT (1984), com a inserção de um fator de correção, o método pode ser aplicado para várias condições climáticas. Levando em consideração essa observação, o método passou a ser conhecido como Blaney & Criddle FAO 24, sendo esse um fator de correção e, função das variáveis de umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar.

A Equação desenvolvida por BLANEY & CRIDDLE (1950) está descrita pela Equação (18)

$$ET = K_p * (0.46 * T_a + 8.13) \quad \text{Equação (18)}$$

Em que: ET é a evapotranspiração [mm dia^{-1}]; K_p é o coeficiente mensal que varia em função da vegetação, do local, da estação do ano, seus valores estão concentrados entre 0.5 a 1.2 [adimensional]; e T_a é a temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$).

Entre as suas principais desvantagens está o problema relacionado à baixa sensibilidade da equação de Blaney & Criddle em regiões em que a temperatura se mantém estável, ou seja, regiões equatoriais, regiões com altitudes elevadas e regiões com alta variabilidade climática nas horas de brilho solar, como: climas de monção, climas de latitude média durante a primavera e o outono. (DOOREMBOS & PRUITT, 1984). Outra desvantagem do método está relacionada à necessidade de calibrar a equação para cada estudo feito para diferentes localidades (POYEN *et al.*, 2016).

Segundo SUBEDI & CHÁVEZ (2015), as maiores vantagens deste método estão relacionadas à sua simplicidade e à sua baixa demanda de variáveis meteorológicas. De acordo com VALIPOUR *et al.* (2017), outra vantagem deste método é que o mesmo faz boas estimativas da evapotranspiração para climas áridos.

2.2.7 A Equação de Priestley & Taylor

O método desenvolvido por PRIESTLEY & TAYLOR (1972) baseia -se no método de PENMAN (1948), sendo que o primeiro método mencionado é uma estimativa da evapotranspiração em função do balanço da radiação solar e do fluxo de calor no solo, multiplicado por um coeficiente empírico α . Nessa metodologia, a superfície de referência é qualquer superfície úmida ou molhada.

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) propuseram que o termo aerodinâmico, presente na equação de PENMAN (1948), fosse negligenciado e substituído pelo coeficiente adimensional α para corrigir a evapotranspiração de equilíbrio, sendo que o conceito, no qual se basearam sobre a evapotranspiração de equilíbrio e o coeficiente α advém dos trabalhos feitos por PRIESTLEY (1959); SLATYER AND MCILROY (1961).

Assim sendo, essa equação é baseada na radiação e é empírica, como mostra a Equação (19).

$$ET_0 = (\alpha * (\Delta / (\Delta + \gamma)) * (R_n - G)) / \lambda \quad \text{Equação (19)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração [mm dia^{-1}]; α é um coeficiente empírico que varia de acordo com o tipo de superfície, época do ano e clima, e que PRIESTLEY & TAYLOR (1972) chegaram a um valor aproximado de 1.26 para diferentes cultivos e superfícies, como represas e lagos que são cobertas apenas com água ; Δ é a declinação da curva de pressão do vapor d'água [$\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$]; γ é a constante psicrométrica [mbar]

$^{\circ}\text{C}^{-1}$]; R_n é o balanço de radiação solar [$\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$], G é o fluxo de calor no solo [$\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; λ é o calor latente de vaporização [cal g^{-1}].

Apesar de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) terem proposto o valor aproximado de 1.26 para o coeficiente α , muitos autores mensuraram o valor de α para as localidades em que fizeram seus estudos. Para o caso de climas áridos o valor de α variou consideravelmente como mostrado por MCNAUGHTON & BLACK (1973), BARTON (1979); SHUTTLEWORTH & CALDER (1979). Vários outros estudos foram feitos para mensurar α para diversos tipos de clima e vegetação, e.g. FLINT & CHILDS (1991); LHOMME (1997); HOBBS *et al.* (2001).

Assim sendo, segundo SUBEDI & CHÁVEZ (2015), este método é mais adequado quando em situações de avaliação de larga escala territorial, além de ser mais fácil a sua utilização quando comparado ao complexo método de Penman-Monteith (Monteith, 1965), e possui uma demanda menor de dados para a estimativa da evapotranspiração. Além disso, segundo VALIPOUR *et al.* (2017), os métodos baseados na radiação em comparação aos métodos combinados e baseados na temperatura, foram os que mostraram melhor desempenho nas estimativas da evapotranspiração para as estações mais quente do ano, sendo assim escolhidos por estes cientistas para avaliações de cenários sob a ação das mudanças climáticas.

Apesar disso, a equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) tem entre as suas principais desvantagens: a necessidade da verificação do coeficiente α , e de não produzir bons resultados de estimativa de evapotranspiração quando sob condições de advecção (SUBEDI & CHÁVEZ, 2015).

2.2.8 A Equação de Camargo

Durante a década de 1970, embasando-se em diversos resultados obtidos pela equação de evapotranspiração potencial, para diferentes regiões, CAMARGO (1971), por meio do método analítico, desenvolveu uma equação que possui resultados de eficiência semelhantes ao método de Thornthwaite, sendo essa equação função apenas da temperatura média do ar e da radiação solar Equação (20).

$$ET_p = Q_0 * T * K * D \quad \text{Equação (20)}$$

Em que: a ET_p é a evapotranspiração potencial [mm.dia^{-1}]; Q_0 é a radiação solar extraterrestre incidente no topo da atmosfera, no dia 15 de cada mês, [mm.dia^{-1} de

evaporação equivalente]; T é a temperatura média do ar diária [$^{\circ}\text{C}$]; K é um fator de ajuste que varia em função da temperatura anual média do ar [$^{\circ}\text{C}$], para $T_a \leq 23.5$, $K = 0,01$, para $23.6 \leq T_a \leq 24.5$, $K = 0.0105$; para $24.6 \leq T_a \leq 25.5$, $K = 0.011$; para $25.6 \leq T_a \leq 26.5$, $K = 0.0115$; para $26.6 \leq T_a \leq 27.5$, $K = 0.012$; ; para $T_a > 27.5$, $K = 0.013$; D é igual ao número de dias do período.

Assim como Thornthwaite, a maior vantagem desta equação é a baixa demanda por dados meteorológicos para o cálculo da estimativa da evapotranspiração, e sua maior desvantagem está relacionada à falta de sensibilidade à advecção de umidade feita pelo ar (FERNANDES *et al.*, 2010; CAVALCANTE JUNIOR *et al.*, 2011).

2.2.9 A Equação de Penman-Monteith

O método de Penman-Monteith é baseado no método de PENMAN (1948), explicado anteriormente. A diferença intrínseca destas duas fórmulas está relacionada à função de resistência da transferência de vapor d'água em sua equação original. No trabalho feito por MONTEITH (1965), equacionou-se a evapotranspiração em função do termo aerodinâmico, presente no método de PENMAN (1948), e da resistência da superfície de uma cobertura vegetal, denominado tal metodologia de equação de Penman-Monteith. Essa equação é classificada como uma equação de métodos combinados, sendo assim um método físico, com termos energéticos e aerodinâmicos e é expressa pela Equação (21).

$$\lambda ET_0 = \{[\Delta(R_n - G)] + \rho_a c_p [(e_s - e_a)]/r_a\} / \left\{ \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right) \right\} \quad \text{Equação (21)}$$

Em que: λ é o calor latente de vaporização da água [J kg^{-1}]; ET_0 é a evapotranspiração de referência [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; R_n é o balanço de radiação solar [W m^{-2}]; G é o fluxo de calor no solo [W m^{-2}]; e_s é a pressão de vapor de saturação [Pa]; e_a é a pressão atual do vapor [Pa], $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor do ar [Pa]; ρ_a representa a densidade média do ar à pressão constante [kg m^{-3}]; c_p é o calor específico do ar [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]; Δ é a declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água [Pa K^{-1}]; γ é a constante psicrométrica [Pa K^{-1}]; r_a e r_s são os coeficientes de resistência aerodinâmica e resistência da cobertura, respectivamente [s m^{-1}].

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem e a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, pediram aos consultores, especialistas e

cientistas da área que realizassem uma pesquisa com a finalidade de se obter uma equação padrão para os cálculos de evapotranspiração. Nesse trabalho foram utilizados 11 experimentos de medidas lisimétricas, as quais mensuraram a evapotranspiração real, ao redor do mundo. Com isso, foi possível analisar estatisticamente as estimativas feitas com inúmeras metodologias existentes a época frente aos dados observados e, então, considerar que o método de Penman-Monteith seria o padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos. (SMITH, 1991; ALLEN *et al.*, 1998). Devido a isso, a equação foi adaptada às condições consideradas como padrão, e está representada pela Equação (22).

$$ET_0 = \frac{\left(0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_m + 273.16}\right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)\right)}{(\Delta + \gamma) \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad \text{Equação (22)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência [mm dia⁻¹]; Δ é a declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água [KPa °C⁻¹]; R_n é o balanço de radiação solar [MJ m⁻² dia⁻¹]; G é o fluxo de calor no solo [MJ m⁻² dia⁻¹]; γ é a constante psicrométrica [KPa °C⁻¹]; T_m é a temperatura média diária do ar [°C]; u_2 é a velocidade do vento a 2 metros [m s⁻¹]; e_s é a pressão de vapor de saturação da água [KPa]; e_a é a pressão atual do vapor da água [KPa], $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor do ar [KPa];

A Equação (22) ficou conhecida como FAO 56 - Penman-Monteith, depois de ser apresentada por ALLEN *et al.* (1998), que também recomenda metodologias de cálculo para a estimativa de algumas variáveis que estão presentes na referida equação.

Segundo DI STEFANO & FERRO (1997); DROOGERS & ALLEN (2002); PEREIRA *et al.* (2002); POPOVA *et al.* (2006); FERNANDES *et al.* (2010), os principais problemas dessas equações estão ligados à quantidade de dados meteorológicos e de vegetação que são necessários para se fazer a estimativa de evapotranspiração e, não somente isso, também à qualidade destes dados que influenciam o resultado final

Para o caso da Equação (21), ainda há o problema da complexidade do cálculo do coeficiente de resistência de cobertura (SUBEDI & CHÁVEZ, 2015).

Uma das principais vantagens da Equação (22) é a de ser acurada para o cálculo da evapotranspiração para a grama na base diária, e a vantagem da Equação (21) é a de ser sensível à resistência de cobertura (SUBEDI & CHÁVEZ, 2015).

2.2.10 A Equação de Hargreaves – Samani

No início da década de 80, Hargreaves e Samani desenvolveram uma equação para a radiação solar global que é em função da radiação solar incidente no topo da atmosfera (HARGREAVES & SAMANI, 1982), que pode ser observada pela Equação (23).

$$R_s = K_{rs} * R_a * TD^{0.5} \quad \text{Equação (23)}$$

Em que: R_s corresponde a radiação solar global [$W m^{-2}$]; K_{rs} é um coeficiente de calibração [adimensional]; R_a a radiação solar incidente no topo da atmosfera [$W m^{-2}$]; TD é a diferença média entre as temperaturas máxima e mínima de uma semana [$^{\circ}C$].

Já em meados da década de 80, HARGREAVES & SAMANI (1985) desenvolveram uma equação para calcular a evapotranspiração, que é em função da temperatura e da radiação solar extraterrestre, dada pela Equação (24).

$$ET_0 = 0.0022 * R_a * (T_a + 17.8) * TD^{0.50} \quad \text{Equação (24)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração [$mm dia^{-1}$]; R_a a radiação solar incidente no topo da atmosfera [$MJ m^{-2} dia^{-1}$]; T_a é a temperatura média do ar [$^{\circ}C$]; TD é a diferença média entre as temperaturas máxima e mínima de uma semana [$^{\circ}C$].

Esse método tem como suas principais vantagens a sua aplicabilidade em climas áridos e semiáridos, como no Nordeste do Brasil, a sua simplicidade para a execução do cálculo de estimativa da evapotranspiração e sua baixa demanda por variáveis meteorológicas (FERNANDES *et al.*, 2010; SUBEDI & CHÁVEZ, 2015). Já a sua desvantagem está na sua imitação de uso para tais condições, apresentando superestimava em climas úmidos (FERNANDES *et al.*, 2010).

2.2.11 A Equação de Stanghellini

A equação desenvolvida por Stanghellini é baseada na equação de Penman - Monteith. O diferencial dessa equação é que ela foi criada com a finalidade de estimar a evapotranspiração dentro de estufas, o coeficiente de resistência de cobertura foi equacionado para região interna da estufa e além disso possui uma equação específica para o cálculo dos fluxos de radiação derivados do empirismo relacionado à absorção de ondas longas e curtas pelas múltiplas camadas de uma determinada vegetação, baseando-se nos trabalhos feitos por KIRNAK & SHORT (2001); PRENGER *et al.*

(2002). Outra variável da metodologia de Stanghellini que sofreu modificação na equação foi a declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água, além disso foram incluídos dois novos termos: o índice de área foliar (LAI) e a resistência radiativa (rR).

A equação de STANGHELLINI (1987) é representada pela Equação (25), algumas das novas equações utilizadas para o cálculo das variáveis contidas na sua metodologia são: as Equações (26-27) do fluxo de radiação, a Equação (28) da declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água e a Equação (29) novo termo de resistência radiativa, (rR).

$$ET_0 = 2 * LAI * \frac{1}{\lambda} * \frac{\Delta * (R_n - G) + K_t * \left(\frac{(e_s - e_a) * \rho_a * C_p}{rR} \right)}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad \text{Equação (25)}$$

$$R_n = (0.07 * R_{ns} - 252 * \rho * C_p * (T - T_0)) / rR \quad \text{Equação (26)}$$

$$R_{ns} = 0.77 R_s \quad \text{Equação (27)}$$

$$\Delta = 0.04145 * e^{0.06088 * T} \quad \text{Equação (28)}$$

$$rR = \rho * C_p / (4 * \sigma * (T + 273.15)^3) \quad \text{Equação (29)}$$

Em que: LAI é o índice de área foliar [$m^2 m^{-2}$]; λ é o calor latente de vaporização [$MJ m^{-2} d^{-1}$]; Δ é a declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água [$Pa^0 C^{-1}$]; R_n é o balanço da radiação solar [$MJ m^{-2} d^{-1}$]; G é o fluxo de calor no solo [$MJ m^{-2} dia^{-1}$]; K_t é o fator de conversão da unidade de evapotranspiração; e_s é a pressão de vapor de saturação da água [KPa]; e_a é a pressão atual do vapor da água [KPa], $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor do ar [KPa]; ρ_a é a densidade média do ar a pressão constante [$kg m^{-3}$]; C_p é o calor específico do ar [$MJ kg^{-1} ^0 C^{-1}$]; rR é a resistência radiativa; γ é a constante psicrométrica [$KPa ^0 C^{-1}$]; r_a e r_s são os coeficientes de resistência aerodinâmica respectivamente [$s m^{-1}$] e de resistência da cobertura, respectivamente [$s m^{-1}$]; R_{ns} é o balanço de radiação de onda curta [$MJ m^{-2} d^{-1}$]; T é a temperatura do ar [$^0 C$]; T_0 é a temperatura da folha de um determinado cultivo [$^0 C$]; σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$MJ m^{-2} K^{-4} dia^{-1}$].

Uma das principais desvantagens dessa equação, assim como FAO 56 Penman-Monteith, é a necessidade de muitas variáveis meteorológicas para o cálculo da estimativa da evapotranspiração, além disto, esta equação foi gerada para fazer

estimativas da evapotranspiração dentro de estufas, limitando o uso da mesma (STANGHELLINI, 1987; SUBEDI & CHÁVEZ, 2015).

Sua principal vantagem é a sua representatividade para a evapotranspiração dentro de ambientes de estufa (STANGHELLINI, 1987).

2.2.12 A Equação da Radiação- Solar

O método da Radiação Solar é baseado na metodologia de MAKKINK (1957) para estimar a evapotranspiração, sendo esse método recomendado quando há dados de temperatura do ar, brilho solar, fator de nebulosidade e radiação, e não há dados sobre o vento e a umidade do ar, sendo equacionado pela Equação (30) (DOOREMBOOS & PRUITT, 1977).

$$ET = C * (W * R_S) \quad \text{Equação (30)}$$

Em que: ET é a evapotranspiração [mm dia⁻¹]; C é igual a um fator de correção [adimensional]; W é uma função de ponderação psicrométrica [adimensional]; R_S é a Radiação Solar Global [mm dia⁻¹].

Posteriormente, DOOREMBOOS & PRUITT (1984) adaptaram a Equação (30), desenvolvendo para tanto a Equação (31).

$$ET = (a+b) * (W * R_S) \quad \text{Equação (31)}$$

Em que: ET é a evapotranspiração [mm dia⁻¹]; a e b são fatores de correção desenvolvidos por FREVERT *et al.* (1983) [adimensional]; W é uma função de ponderação psicrométrica [adimensional]; R_S é a Radiação Solar Global [mm dia⁻¹].

A equação da Radiação Solar tem como uma das suas principais vantagens a sua capacidade de trazer bons resultados sob a influência de climas úmidos, e o fato de não necessitar de dados observados de vento e umidade do ar para estimar a evapotranspiração (DOOREMBOOS & PRUITT, 1977; FERNANDES *et al.*, 2010).

Porém, essa metodologia tem como uma de suas principais desvantagens a necessidade de muitos dados meteorológicos para o cálculo da estimativa (FERNANDES *et al.*, 2010).

2.3 Análise dos Métodos de Cálculo da Evapotranspiração no Brasil e no Mundo

Em vista da quantidade de metodologias disponíveis para o cálculo da evapotranspiração, como as de PENMAN (1948); HARGREAVES & SAMANI (1962); MONTEITH (1965); PRIESTLEY & TAYLOR (1972); STANGHELLINI, (1987); ALLEN *et al.* (1998), e a extensão territorial brasileira em conjunto com a grande diversidade climática encontrada no Brasil, como mostrado por KÖPPEN & GEIGER (1936); ALVARES *et al.* (2013), muitos experimentos sobre a evapotranspiração e a eficácia das metodologias existentes para diferentes locais e climas foram conduzidos no Brasil, dentre estes experimentos estão: LOBATO & LOBATO (1979); CAMARGO & SENTELHAS (1997); MENDONÇA *et al.* (2003); FIETZ *et al.* (2005); CARVALHO *et al.* (2006); OLIVEIRA *et al.* (2008); BARROS *et al.* (2009); SOUZA *et al.* (2011).

Muitos desses trabalhos demonstraram que a equação de evapotranspiração recomendada pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO 56-Penman-Monteith) nem sempre é a que apresenta o melhor desempenho para a estimativa da evapotranspiração, ou até mesmo não pode ser aplicada por causa da alta demanda por variáveis meteorológicas, que nem sempre estão disponíveis, ou devido à baixa qualidade dos dados, ou por conta da complexidade do cálculo de resistência da cobertura. Assim, muitas vezes a equação de FAO 56-Penman-Monteith precisa ser substituída por outras metodologias tradicionais existentes ou por metodologias adaptadas para o clima onde é feita a estimativa da evapotranspiração.

Esse tipo de análise, do desempenho das metodologias de estimativa da evapotranspiração frente aos dados observados, não foi feita apenas para regiões brasileiras, como também existem trabalhos ao redor do mundo sobre o assunto, como os trabalhos realizados por STANNARD (1993); ABTEW (1996); MEYER (1999); MAO *et al.* (2002); DEHGHANISANIJ *et al.* (2004); SUMMER & JACOBS (2005); SCHNEIDER *et al.* (2007); WEIB & MENZEL (2008); DOUGLAS *et al.* (2009b); RAZZAGHI & SEPASKHAH (2010); RÁCZ *et al.* (2013); LIU *et al.* (2017); VALIPOUR *et al.* (2017), os quais em sua maioria também mostram que, em determinadas condições, a equação da FAO56-Penman-Monteith não é considerada a metodologia que apresentou o melhor desempenho, ou ainda, mostram que há equações

que demandam uma quantidade de dados menor e apresentam desempenho semelhante ao da FAO 56-Penman-Monteith.

Há trabalhos, inclusive, que já levam em consideração uma das maiores limitações da equação da FAO56-Penman-Monteith, que é a alta demanda por dados de entrada. Com isso, os pesquisadores fazem a comparação da evapotranspiração simulada dos modelos que demandam uma menor quantidade de dados em relação ao dado observado de evapotranspiração, como no trabalho feito por LU *et al.* (2005). Há também, aquelas pesquisas que devido à alta exigência de dados e à alta complexidade da equação FAO 56-Penman-Monteith, citam a possibilidade de trabalhar com outras equações que apresentam desempenho semelhante à equação FAO56-Penman-Monteith (ABTEW, 1996; YODER *et al.*, 2005).

Alguns trabalhos citam a questão da qualidade intrínseca dos dados exigidos pela equação FAO56-Penman-Monteith, e a sensibilidade da equação aos erros encontrados nestes dados, que podem levar a resultados de baixa qualidade (BEVEN, 1979; DROOGERS & ALLEN, 2002). DROOGERS & ALLEN (2002), mostram também, que existem equações menos sensíveis a estes erros que são recomendáveis nestas situações.

No trabalho de WEIB & MENZEL (2008) é observada outra aplicação do cálculo de evapotranspiração, sendo utilizada dentro de modelos hidrológicos para auxiliar nas estimativas de fluxo hídrico. Nesse trabalho foram comparados quatro métodos de estimativa, sendo a equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) a que se mostrou mais adequada para ser utilizada em escala global para estudos relacionados ao fluxo hídrico. OUDIN *et al.* (2005), seguiram na mesma temática e chegaram à conclusão de que as equações de evapotranspiração com base na temperatura e na radiação tendem a prover melhores resultados aos modelos hidrológicos do que as equações baseadas em Penman.

O estudo da análise de desempenho de diversas metodologias de evapotranspiração em relação aos dados observados, incluindo a equação FAO 56-Penman-Monteith, para o caso brasileiro mostra que em determinadas regiões como o Nordeste, por exemplo, a equação que obteve o melhor desempenho foi o método da Radiação Solar (DOOREMBOS & PRUITT, 1984), e em segundo lugar o método desenvolvido por BLANEY & CRIDDLE (1962), como mostrado na pesquisa realizada por OLIVEIRA *et al.* (2008).

Já para a região Centro-Oeste, FIETZ *et al.* (2005) mostraram que o método de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) é um dos que apresentou melhor performance para a

estimativa da evapotranspiração, quando comparado aos dados observados da evapotranspiração medida por um lisímetro de pesagem.

Um dos trabalhos feitos na região Sudeste que pode ser citado é o trabalho feito por CAMARGO & SENTELHAS (1997). Esse trabalho avaliou estatisticamente 20 estimativas de evapotranspiração frente aos dados observados, e concluiu que alguns métodos de estimativa, e. g. CAMARGO (1971) e PRIESTLEY & TAYLOR (1972), possuíam maior semelhança ao dado observado do que a equação de FAO 56-Penman-Monteith.

Já VILLA NOVA & PEREIRA (2006) fizeram uma análise calibrando a equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) e essa equação calibrada obteve dois níveis de desempenho: (1) No primeiro experimento foram observados resultados semelhantes entre a equação de FAO 56-Penman-Monteith e a de PRIESTLEY & TAYLOR (1972), quando comparados aos dados de evapotranspiração observada; (2) Já no segundo experimento, a equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) apresentou leve superioridade de correlação com os dados observados, quando comparados aos valores estimados pela equação FAO 56-Penman-Monteith .

Assim sendo, apesar da equação de evapotranspiração FAO 56-Penman-Monteith ser a metodologia recomendada pela a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação e ser apropriada para diversos tipos de clima, como mostrado por ALLEN *et al.* (1989); JENSEN *et al.* (1990); STEINER *et al.* (1991); KASHYAP & PANDA (2001); SULEIMAN & HOOGENBOOM (2007), muitas vezes ela não possui o melhor desempenho, ou não é aconselhável por causa da qualidade dos dados e devido à alta complexidade do cálculo de algumas variáveis necessárias à sua equação, até mesmo sendo considerada impraticável frente a quantidade de dados necessários.

Uma das funcionalidades dessas diversas metodologias de evapotranspiração é a de contribuir como variável em diversos cálculos dentro de modelos agrícolas, como por exemplo, no cálculo da produção/produtividade e no cálculo da necessidade hídrica de uma determinada cultura. Sendo a evapotranspiração uma componente central dentro desses modelos, é possível observar que cálculos acurados do crescimento dos cultivos, assim como da produtividade, dependem dos cálculos acurados da evapotranspiração, como mencionado por DEJONGE & THORP (2017).

Atualmente, existem inúmeros modelos de sistema agrícola, como APSIM¹² (MCCOWN *et al.*, 1995), EPIC¹³ (WILLIAMS *et al.*, 1989), STICS¹⁴ (STÖCKLE *et al.*, 2003), WOFOST¹⁵ (VAN DIEPEN *et al.*, 1989), INFOCROP (AGGARWAL *et al.*, 2006) e o DSSAT-CSM¹⁶ (JONES *et al.*, 2003). Porém, na maioria destes modelos são disponibilizadas apenas algumas equações de estimativa para a evapotranspiração, dentre elas a FAO 56-Penman-Monteith, que, como visto anteriormente, não contribui necessariamente com o melhor desempenho do resultado da simulação do modelo agrícola, em termos de proximidade com a realidade.

No trabalho preliminar feito por KIMBALL *et al.* (2016), é possível observar o quão importante é a escolha do método de cálculo da evapotranspiração para a modelagem agrícola. Nesse trabalho foram comparados 29 modelos agrícolas, parametrizados para o milho, onde os resultados de evapotranspiração dos modelos agrícolas variaram em torno de 500 mm entre eles para um mesmo cenário em que foram fornecidos os mesmos dados de clima, solo e gestão agrícola.

No trabalho feito por LIU *et al.* (2016), foi analisada a sensibilidade do modelo agrícola (EPIC) às variações na metodologia de evapotranspiração, sendo possível observar variações significativas no resultado do modelo.

É possível trabalhar com um modelo agrícola, que tenha em conjunto uma equação desenvolvida para a área estudada e que traga contribuições ao resultado final do modelo, fazendo com que esse resultado seja mais próximo à realidade da região estudada; tratando do clima, do cultivo e do solo de forma mais regionalizada; e auxilie na avaliação da expansão de cultivos agrícolas sobre o efeito de cenários de mudanças climáticas?

Uma das hipóteses que será testada dar-se-á através da utilização de uma equação modificada, com base na metodologia desenvolvida por PRIESTLEY & TAYLOR (1972), que será inserida dentro de um modelo de sistema agrícola, utilizando também, o cálculo desenvolvido por STANGHELLINI, (1987) para a declinação da curva de saturação da pressão do vapor d'água, Equação (28), com o intento de melhorar os resultados da modelagem de sistema agrícola.

Tal hipótese tem como premissas:

¹² APSIM - *Agricultural Production System Simulator*.

¹³ EPIC - *Environmental Policy Integrated Climate Model*.

¹⁴ STICS - *Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard*.

¹⁵ WOFOST – *World Food Studies*.

¹⁶ DSSAT – *Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Crop system model*.

- a) Uma menor demanda de dados meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração, utilizando, a metodologia desenvolvida por PRIESTLEY & TAYLOR (1972) que exige uma menor quantidade de dados meteorológicos em relação à metodologia de FAO 56-PENMAN-MONTEITH, e possui qualidade semelhante, como mostrado por STANNARD (1993); LU *et al.* (2005); WEIB & MENZEL (2008).
- (b) A seleção do método de estimativa de evapotranspiração que possui o melhor desempenho, ou um dos melhores desempenhos, para o clima da região estudada, sendo mais uma vez, escolhida a metodologia de PRIESTLEY & TAYLOR (1972), como mostrado nos trabalhos de CAMARGO & SENTELHAS (1997); FIETZ *et al.* (2005); DOUGLAS *et al.* (2009b).
- (c) A utilização de uma equação da declinação de curva de saturação da pressão do vapor d'água que seja específica para ambientes de estufa, possuindo assim, maior semelhança com um cenário de mudanças climáticas do que as equações tradicionais existentes. Sendo escolhida a (Equação (27)), pertencente à metodologia de STANGHELLINI (1987).
- (d) A utilização de uma metodologia que possua uma menor sensibilidade aos erros contidos nos dados meteorológicos, quando comparado à sensibilidade da equação FAO 56-Penman-Monteith. Como mostrado por BEVEN (1979), a equação FAO56-Penman – Monteith possui alta sensibilidade a este tipo de incerteza. HA *et al.* (2017) sugere, inclusive, que na condição dos dados do balanço de radiação possuírem um nível baixo de erro, torna-se possível obter estimativas confiáveis de evapotranspiração através da equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972). RÁCZ *et al.* (2013), mostra que PRIESTLEY & TAYLOR (1972) é uma das equações que se mantém mais estáveis em relação às mudanças nas principais variáveis meteorológicas. Com base no que foi argumentado, a metodologia de PRESTLEY & TAYLOR também atende a esta premissa.

CAPÍTULO III

3. A MODELAGEM AGRÍCOLA

De forma geral, um modelo pode ser definido como um conjunto de informações atribuídas a algo (processo, ideia, objeto, sistema etc.) que se intenta representar. Essa representação pode variar do método mais simplificado ao mais complexo, podendo conter apenas uma descrição simbólica, ou até uma descrição das interações e interrelações existentes sobre aquilo que se deseja representar. Essa representação pode ser feita de diversas maneiras, desde a descrição teórica até equações descritivas da simulação. Além disto, o objetivo da modelagem pode estar ligado à representação estática, ou à simulação de um cenário passado, ou até mesmo à previsão de um cenário (GILBERT & BOULTER, 1998; JACOBSON, 2005; BRATLEY *et al.*, 2011).

O modelo de cultura ou modelo agrícola pode ser definido como um modelo que representa um determinado cultivo e os processos relacionados a ele, simulando principalmente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade e utilizando para isso equações matemáticas e físicas que descrevem os diversos processos intrínsecos à cultura e ao seu cultivo em função de variáveis ambientais e genéticas (SINCLAIR & SELIGMAN, 1996; MONTEITH 1996; SOLER, 2004). De acordo com PENNING DE VRIES (1982), a maioria dos modelos agrícolas trabalha de maneira sistemática e suas equações são funções da reunião de informações adquiridas, sendo elas teóricas ou empíricas, e esses modelos têm como principal resultado a produção quantitativa da cultura simulada. De grosso modo, os balanços do carbono e hidrológico são partes constituintes desses modelos.

Existem inúmeras classificações para a modelagem como, por exemplo, a subdivisão em categorias como citado por (AGOSHKOV, 2002; NIEDER & BENBI, 2003; CORRÊA *et al.*, 2011). Uma das classificações mais utilizadas na área da modelagem agrícola é a feita por ADDISCOTT & WAGENET (1985); ADDISCOTT (1993). ADDISCOTT & WAGENET (1985) classificou os modelos de lixiviação de solutos no solo de acordo com a abordagem apresentada pelo modelo, e esta classificação se apresenta da seguinte forma:

- a) **Modelo Determinístico:** Um modelo determinístico é aquele que não considera a aleatoriedade, ou seja, um determinado evento simulado, dada uma sequência de eventos, terá apenas um resultado.
- b) **Modelo Estocástico:** Um modelo estocástico leva em consideração a aleatoriedade, em que um determinado evento simulado pode ter uma gama de resultados.
- c) **Modelo Determinístico Funcional:** Neste tipo de modelo há uma maior simplificação dos mecanismos que se intenta simular, ou seja, o objetivo deste tipo de modelagem não é tentar descrever os mecanismos de maneira mais realista possível e sim da forma mais simplificada que ainda consiga preservar as características dos processos simulados. De acordo com DE WILLIGEN, (1991) *apud* ADDISCOTT, (1993), esse tipo de modelo frequentemente provê bons resultados, apesar das simplificações.
- d) **Modelo Determinístico Mecanístico:** Já nesse tipo de modelo as variáveis de estado se baseiam em equações físicas e matemáticas que explicam um determinado evento que se deseja simular, trabalhando de forma segmentada, onde cada parte é simulada seguindo uma sequência de eventos e suas inter-relações, se assemelhando aos mecanismos observados normalmente na natureza. Vale ressaltar que quando considerado um único cenário de entrada e uma única forçante de sequência de eventos, esse tipo de modelo apresentará apenas um resultado.
- e) **Modelo Estocástico Mecanístico:** Nesse tipo de modelagem é utilizada uma distribuição de valores aleatórios como dado de entrada para um modelo mecanístico, tendo como resultado uma distribuição de cenários possíveis.
- f) **Modelo Estocástico Não-Mecanístico:** Nesse tipo de modelo não há o conhecimento das equações físicas que governam o determinado evento que se deseja simular. As equações que são a base deste tipo de simulação estão relacionadas às funções de probabilidade que se baseiam nos dados observados.

Além disso, os modelos podem ser subdivididos em estáticos que não variam com o tempo e/ou o local, e dinâmicos, que variam com o tempo e/ou o local, (FISHWICK, 2007). Ainda há os modelos de sistemas, sendo este último tipo de alta complexidade,

pois são submodelos que integram uma plataforma, trabalhando de forma mecânica e vão sendo chamados em uma ordem específica de eventos que é comandada por um modelo central de controle (NIEDER & BENBI, 2003).

Para o caso dos modelos de sistema agrícola, eles podem ser contínuos ou modulares. O caso modular pode ainda ser dividido em três diferentes abordagens: a primeira é a chamada de “*Escola de DE WIT*”, a segunda é a do modelo DSSAT e a terceira é a do modelo APSRU¹⁷ (JONES *et al.*, 2001).

Como citado por BOOTE *et al.* (1996) e por JONES *et al.* (2016); HOLZWORTH *et al.* (2015), os modelos de sistema agrícola estão abrangendo cada vez mais áreas de estudo fora de seu escopo inicial e vêm ganhando destaque em áreas como a do desenvolvimento da gestão agrícola sustentável. Essa notoriedade crescente dos modelos deve-se ao fato dos experimentos agrícolas de cunho observacional serem custosos e nem sempre conseguirem prover a quantidade de informações que são necessárias para um bom planejamento da gestão agrícola. Os modelos agrícolas são capazes de simular diversas estratégias de plantio, avaliando os riscos, a sustentabilidade, o custo-benefício, bem como o planejamento agrícola, com uma menor oneração quando comparados aos experimentos práticos agrícolas.

Além disso, os modelos são capazes de trabalhar: com previsões, e.g. (BANNAYAN *et al.*, 2003; TAN & SHIBASAKI, 2003); auxiliar no melhoramento genético, e.g. (HOOGENBOOM *et al.*, 2004), gerar inúmeros cenários para avaliar o potencial produtivo, e.g. (VAN ITTERSUM *et al.*, 2013; MONTEIRO & SENTELHAS, 2014), auxiliar os tomadores de decisão em relação às políticas públicas na área agrícola e.g. (BEZLEPKINA *et al.*, 2010) etc.; enquanto que os experimentos práticos possuem limitações à realização destas tarefas.

Os primeiros trabalhos sobre modelagem agrícola ocorreram no início da década de 1950 (VAN BAVEL, 1953; DE WIT, 1958) e tais trabalhos começaram a inserir equações físicas sobre os processos do solo e das plantas em programas computacionais. Durante as décadas de 1960 a 1980, o balanço hídrico foi analisado e integrado aos modelos (RITCHIE, 1972; MCCOWN, 1973). Entre a década de 1980 e início da década de 1990 começaram a surgir modelos agrícolas mais sofisticados com diversos tipos de simulações integradas (ACOCK *et al.*, 1985; BROWN *et al.*, 1985; RITCHIE & OTTER, 1985; KEATING *et al.*, 1991; HEARN, 1994).

¹⁷ Agricultural Production Systems Research Unit (Mc COWN *et al.*, 1996).

Esses modelos continuam evoluindo, como mencionado por BOOTE *et al.* (2010); HOLZWORTH *et al.* (2015), e vêm sendo empregados, também, na área de impactos das mudanças climáticas na agricultura, JONES & THORTHON (2003); LUO *et al.* (2005); LUDWIG & ASSENG (2006); KANG *et al.* (2009); NELSON *et al.* (2010); KALAUGHER *et al.* (2013); NELSON *et al.* (2014).

Muitos desses modelos de sistema agrícola foram testados e comparados entre si, com a finalidade de se obter os mais diversos cenários frente às diferenças existentes de cálculo e parametrização entre esses modelos, sendo também avaliada a sensibilidade das modelagens às variações, e.g. ocasionadas pelas mudanças climáticas e pelas respostas à fertilização (BONFANTE *et al.*, 2010; ROSENZWEIG *et al.*, 2013; ROSENZWEIG *et al.*, 2014; BASSU *et al.*, 2014; SALO, 2016; RUANE *et al.*, 2017).

3.1. Os Modelos de Sistema Agrícola

3.1.1 O Modelo APSIM

De acordo com MCCOWN *et al.* (1995), em 1991 na Austrália, a Unidade de Pesquisa de Sistemas Agrícolas de Produção reuniu trabalhos de dois grupos de pesquisas sobre modelagem agrícola: um deles trabalhava com o modelo PERFECT (LITTLEBOY *et al.*, 1989; DIMES & FREEBAIRN, 1993) e o outro com o modelo AUSIM (MCCOWN & WILLIAMS, 1989). Juntos desenvolveram o modelo APSIM.

Segundo MCCOWN *et al.* (1996), o modelo de sistema agrícola APSIM é uma plataforma que inclui diversos módulos que podem ser selecionados de acordo com a simulação do cultivo ou da pastagem que se deseja pesquisar. O modelo possui ainda uma ampla variedade de simulações que podem ser escolhidas de acordo com o enfoque desejado ao cenário de determinado cultivo, no qual as variáveis dinâmicas como a degradação do solo, a degradação de matéria prima do solo, o fluxo de água e nutrientes no solo, além de importantes variáveis da gestão agrícola como o sistema de rotação de cultivos e o preparo do solo, podem ser analisadas.

Esse modelo tem como seu principal objetivo auxiliar as tomadas de decisão relacionadas à gestão e ao planejamento agrícola, apresentando, cenários sob condições padrão e de risco (MCCOWN *et al.*, 1995).

Ainda de acordo com MCCOWN *et al.* (1995), as principais equações deste modelo estão fortemente relacionadas ao solo. Desta forma, esse modelo é muito

sensível às variações dos dados de entrada das equações de solo, tanto advindas das variações meteorológicas quanto das variações na gestão agrícola.

Segundo APSIM (2016), o cálculo da evapotranspiração potencial que é feito dentro do modelo leva em consideração o conceito da evapotranspiração de equilíbrio de PRIESTLEY & TAYLOR (1972).

O modelo APSIM trabalha de forma modular, em que tais módulos podem ser separados da seguinte forma (KEATING *et al.*, 2003):

- (1) Módulo “*ENGINE*” – Responsável pelo controle de todos os outros módulos;
- (2) Uma matriz de módulos sobre culturas, pastagem e floresta – Nessa matriz são simuladas as interações dos cultivos e plantas com o solo, além do crescimento, desenvolvimento e a produção destas plantas e cultivos;
- (3) Conjunto de módulos sobre Dinâmica de Solutos no solo e Balanço Hídrico – Nesse conjunto de módulos o balanço hídrico no solo, assim como a dinâmica de solutos no solo é simulada;
- (4) Conjunto de módulos sobre matéria orgânica do solo e ciclo do nitrogênio – É simulada a dinâmica de matéria orgânica na superfície, assim como, em todas as camadas do solo, contando ainda, com três sistemas de equações para piscinas de matéria orgânica, simulando também o ciclo do nitrogênio em um módulo específico;
- (5) Módulo de resíduos – Como descrito por PROBERT *et al.* (1998), nesse módulo os resíduos advindos dos cultivos são equacionados através de um sistema de piscina de resíduos que se encontra na superfície e é descrito em termos de sua massa, área de cobertura do solo, e a densidade de nitrogênio dentro do sistema;
- (6) Módulos para o Fósforo, PH do solo, e Erosão do solo – Existem dentro do modelo APSIM dois módulos que simulam a liberação de nitrogênio e fósforo pelos adubos para o solo e um segundo módulo que simula a transformação de fósforo dentro do solo. Já para o Ph do solo, há um módulo que simula a acidificação do solo e as mudanças da distribuição do Ph entre as camadas do solo. O módulo de erosão do solo, simula a erosão do solo e os impactos sobre a produtividade.

- (7) Módulo do manejo – Este módulo permite criar cenários de manejos, em que o usuário do modelo pode selecionar informações sobre gestão agrícola e criar cenários desde simples até cenários de alta complexidade e, além disso, permite simular sistemas de controle do modelo APSIM.
- (8) Módulos de sistemas de rotação/consorciação/invasoras – Neste conjunto de módulos, controlados pelo módulo *ENGINE*, são simulados a competição biológica entre plantas ou cultivos, os sistemas de rotação e a consorciação entre as plantas e cultivos;
- (9) Módulo de multi-pontos – Nesse módulo os dados advindos dos outros módulos, que são todos pontuais, são espacializados;

Esse modelo vem sendo utilizado em trabalhos nas mais diversas áreas, para a simulação de gases do efeito estufa THORBURN *et al.* (2010), ROBERTSON *et al.* (2001), para a análise do estresse hídrico na cana de açúcar, INMAN-BAMBER *et al.* (2010) e para avaliação do impacto das mudanças climáticas na agricultura, TUBIELLO & EWERT (2002); YANG *et al.* (2014), dentre outras áreas.

3.1.2 O Modelo EPIC

O modelo de sistema agrícola EPIC (Calculadora do Impacto da Erosão na Produtividade – *Erosion Productivity Impact Calculator*), foi criado à princípio para avaliar a produtividade de solos que sofreram erosão e desenvolvido no início da década de 1980. A primeira pesquisa relacionada a esse modelo de grande escala territorial ocorreu em meados da década de 1980, quando foi utilizado como ferramenta auxiliadora da lei de 1977 de Conservação de Recursos da Água e Solo dos Estados Unidos da América, quanto a avaliação da potencialidade produtiva, e da necessidade de fertilizantes dos solos que sofreram erosão para o ano de 1985 (WILLIAMS *et al.*, 1989; JONES *et al.*, 1990).

Entre os anos de 1981 e 1996 o modelo sofreu modificações. Foram inseridas funções ligas à qualidade da água e, sobre o efeito do CO₂ no crescimento das plantas e no uso da água, submodelos sobre a nitrificação dentre outras inovações. Com isso, o modelo mudou de nome, apesar de continuar com a mesma sigla, EPIC (Clima Integrado à Política Ambiental – *Environmental Policy-Integrated Climate*) (NEARING *et al.*, 1996).

O modelo EPIC conta com cinco opções de metodologias de cálculo da evapotranspiração HARGREAVES & SAMANI (1985), PENMAN (1948), PRIESTLEY-TAYLOR (1972), PENMAN-MONTEITH (MONTEITH 1965) e BAIER & ROBERTSON (1965), (NEARING *et al.*, 1996; GASSMAN *et al.*, 2004).

O modelo EPIC trabalha de forma contínua e com dados de entrada na frequência diária, sendo seus principais componentes: a simulação meteorológica, a simulação hidrológica, a simulação da erosão-sedimentação, o ciclo de nutrientes; o crescimento de plantas, as práticas de manejo, a simulação da temperatura do solo e a simulação econômica (WILLIAMS *et al.*, 1989)

Devido à sua versatilidade esse modelo é aplicado em diversas áreas, como na previsão da produtividade agrícola em diversas escalas, e.g. XIONG *et al.* (2016); BALKOVIČ *et al.* (2013), na área de planejamento agrícola, e.g. BRYANT *et al.* (1992); WANG, X. *et al.* (2006), na área de dinâmica dos solos, e.g. IZAURRALDE *et al.* (2006), dentre outras áreas.

3.1.3 O Modelo STICS

O modelo de sistema agrícola STICS foi criado na França durante a década de 1990 e é um modelo dinâmico de cultivo genérico, que simula as interações entre o solo-planta-atmosfera entre um cultivo ou vários cultivos em sistema de rotação. Esse modelo tem como principal objetivo calcular a produtividade de um determinado cultivo e ainda é capaz de trabalhar com diversos tipos de cultivo e possuir uma maior facilidade no acréscimo de novos cultivos e de novas técnicas de manejo (BRISSON *et al.*, 2003).

Ainda segundo BRISSON *et al.* (2003), para o cálculo da evapotranspiração o modelo utiliza a metodologia de PRIESTLEY & TAYLOR (1972), e tem como diferencial a possibilidade de variar o coeficiente empírico α .

Este modelo é dividido em nove módulos principais (BRISSON *et al.*, 2003):

- (1) Fenologia, Crescimento da parte aérea e Formação da produtividade - Esses três módulos são responsáveis por simular todo o crescimento e desenvolvimento da planta na parte aérea.

- (2) Crescimento da raiz, Balanço hídrico, Balanço do nitrogênio e Transferências do solo – Nesses quatro módulos são simuladas todas as interrelações entre as funções do solo e a parte do cultivo que está abaixo da superfície.
- (3) Módulo de Manejo- São simuladas as técnicas de manejo que podem ser aplicadas ao cultivo e suas interações com o cultivo e o solo simulado.
- (4) Módulo de Microclima – Responsável por simular o efeito combinado entre o clima e o balanço hídrico, envolvendo principalmente a temperatura e a umidade do ar da camada atmosférica próxima a superfície.

Esse modelo é utilizado em trabalhos para a análise de diferentes técnicas de gestão agrícola, e.g. JÉGO *et al.* (2008); HOULÈS *et al.* (2004), para a previsão de safra, e.g. JÉGO *et al.* (2012); VALADE *et al.* (2014), para a avaliação do potencial produtivo STRULLU *et al.* (2015), dentre outras abordagens.

3.1.4 O Modelo WOFOST

O modelo de sistema agrícola WOFOST foi documentado pela primeira vez por VAN KEULEN & WOLF (1986) e foi desenvolvido em Wageningen, na Holanda, pelo Centro de Estudos sobre a Alimentação Mundial, em uma cooperação com o Departamento de Teoria da Produção Ecológica pertencente a Universidade de Wageningen e com o Centro de Pesquisa Agrobiológico (VAN DIEPEN *et al.*, 1989).

Esse modelo trabalha de forma dinâmica e mecanística, fazendo simulações apenas para cultivos de período anual, e utiliza como dados de entrada de frequência diária, como o tipo de solo, a espécie do cultivo, as condições hidrológicas e as meteorológicas; apesar de não existirem restrições de escala territorial, ele trabalha de forma pontual, podendo ser espacializado através de técnicas de interpolação. A principal função deste modelo é calcular a produtividade potencial do cultivo simulado (VAN DIEPEN *et al.*, 1989; SUPIT, 1994).

A produtividade potencial que é calculada pelo modelo WOFOST considera que o fornecimento inadequado de luz, de água, de nutrientes e de temperatura; a concentração inadequada de CO₂ na atmosfera, e o acometimento por pestes, doenças ou poluentes são fatores limitantes à produtividade (VAN DIEPEN *et al.*, 1989; DE WIT *et al.*, 2019).

Esse modelo é uma ferramenta que faz parte do sistema operacional de monitoramento da Comissão Europeia, auxiliando a Política Agrícola Comum da União Europeia, onde são feitas previsões de safra, o monitoramento agrícola etc. (DE WIT *et al.*, 2019)

Segundo SUPIT (1994); BOOGAARD *et al.* (1998), o modelo WOFOST apresenta atualmente duas metodologias para o cálculo da evapotranspiração: PENMAN (1956) adaptada por FRERE & POPOV (1979), e PENMAN-MONTEITH, MONTEITH (1965).

As principais sub-rotinas deste modelo de sistema agrícola, como mostrado na Figura (5), são divididas da seguinte forma (SUPIT, 1994):

- (1) Módulo de Controle cronológico – Responsável por integrar as passagens de tempo do modelo, atualizando o tempo com o período subsequente. Tal sub-rotina funciona de forma pontual.
- (2) Módulo de simulação Meteorológica– Toda a parte de cálculos relacionados à meteorologia é feita por meio dessa sub-rotina.
- (3) Módulo do Crescimento do Cultivo – Nesse módulo as interações entre o solo e a atmosfera com a planta começam a ser calculadas, o crescimento e o desenvolvimento do cultivo analisado são equacionados nessa sub-rotina.
- (4) Módulo do Balanço Hídrico – É equacionado o balanço hídrico do cenário simulado.
- (5) Módulo de Nutrientes – Nesse módulo, que não está incluso em todas as versões do modelo WOFOST, são calculados, na frequência anual, as necessidades de nutrientes das plantas, baseando-se na metodologia desenvolvida por JENSEN *et al.* (1990).
- (6) Módulo de estatística - Também não está incluso em todas as versões desse modelo, nele é simulada a análise estatística do manejo agrícola e desenvolvimento do cultivo.

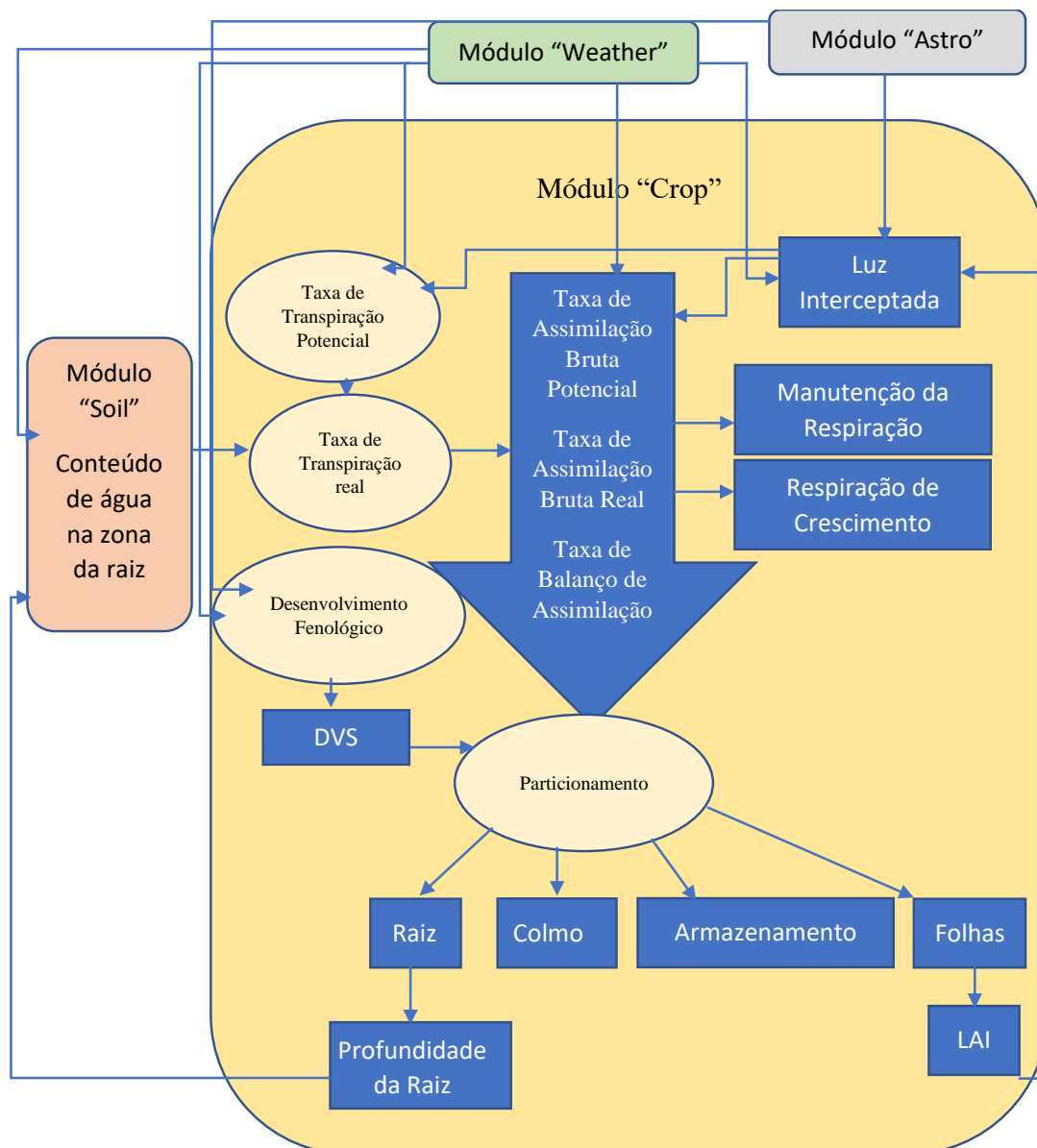


Figura 5: Fluxograma dos módulos do modelo de sistema agrícola WOFOST. Fonte: Tradução própria com base em DE WIT *et al.* (2015).

Esse modelo é aplicado em diversas áreas, como na área de impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola, e.g. SUPIT *et al.* (2012); WOLF & VAN DIEPEN (1995), impacto das variações na área de gestão agrícola, e.g. RÖTTER *et al.* (1997), avaliação do desempenho da simulação da produtividade agrícola em escalas territoriais maiores do que a pontual, e.g. BOOGAARD *et al.* (2013), dentre outras áreas.

3.1.5 O Modelo CROPSYST

O modelo de sistema agrícola CROPSYST foi criado no início da década de 1990 e o seu desenvolvimento baseou-se nos pontos fortes do modelo de sistema agrícola

EPIC (WILLIAMS *et al.*, 1989), porém seu enfoque diverge deste modelo, possuindo uma abordagem mais direcionada aos processos de manejo no campo e suas interações com o cultivo, e na simulação do crescimento do cultivo. Seu principal objetivo é calcular a produtividade e o impacto ambiental relacionado à rotação de culturas e às variações técnicas no manejo da cultura (STÖCKLE *et al.*, 2003).

O CROPSYST é um modelo mecanístico dinâmico que trabalha de forma modular. Seus dados de entrada são de frequência diária e nele existem duas metodologias de cálculo da evapotranspiração: a metodologia FAO 56-PENMAN-MONTEITH (ALLEN *et al.*, 1998) e a metodologia de PRIESTLEY & TAYLOR (1972). Nesta última metodologia, o parâmetro α da equação pode ser selecionado, porém seu valor só pode variar entre 1 e 2 (STÖCKLE & NELSON, 2003).

Segundo STÖCKLE *et al.* (2003), os programas que compõem esse modelo são divididos da seguinte forma:

- (1) Programa “*CROPSYST Parameter editor*” - Programa responsável pela interface usuário – modelo, no qual é possível modificar parâmetros dentro do modelo, selecionar qual submodelo será utilizado, e gera o relatório com os resultados do modelo.
- (2) Programa “*CROPSYST*” – Esse programa é a base do modelo CROPSYST e nele é feita a simulação da produtividade do cultivo e da rotação de cultivos em função das condições meteorológicas, do solo e da gestão agrícola.
- (3) Programa “*CLIMGEN*” – Esse programa é um gerador de dados meteorológicos, que utiliza a estatística de séries climáticas para gerar seus resultados.
- (4) Programa “*ArcCS*” – Nesse programa os resultados do modelo CROPSYST são especializados através da técnica de interpolação por polígonos.
- (5) Programa “*CROPSYST WATERSHED*” – Esse programa é uma extensão do modelo CROPSYST, no qual é possível fazer análises para bacias hidrográficas, usando dados georreferenciados em formato de grade.

Já os módulos do CROPSYST podem ser divididos em (STÖCKLE *et al.*, 2003):

- (1) Módulo do Balanço Hídrico – Responsável por simular todo o balanço hídrico do modelo tanto na superfície quanto abaixo dela, simulando por exemplo, a evapotranspiração e a distribuição de água no solo.
- (2) Módulo do Balanço de Nitrogênio – Nesse módulo é simulado todo o ciclo do nitrogênio do modelo.
- (3) Módulo da Fenologia do Cultivo – Simula o desenvolvimento de um cultivo, que será função da metodologia de graus-dia, fotoperíodo e possui a possibilidade da seleção da vernalização para fazer a simulação.
- (4) Módulo do Acúmulo de Biomassa – Nesse módulo é simulado o potencial de crescimento da biomassa, que é função da transpiração, da radiação fotossinteticamente ativa, dentre outros.
- (5) Módulo do desenvolvimento da área foliar – Nesse módulo é simulado o crescimento da área foliar, sendo função do acúmulo de biomassa.
- (6) Módulo da produção – Módulo responsável pela simulação da produção em função do acúmulo de biomassa e o índice de colheita, que é razão entre a produção que pode ser colhida e a biomassa que existe na superfície.
- (7) Módulo de Resposta do Crescimento do Cultivo à Variação de Concentração de CO₂ na Atmosfera – Esse módulo simula a resposta do crescimento do cultivo frente às alterações da concentração de CO₂ na atmosfera, sendo esta simulação em função de dados experimentais sobre o tema.
- (8) Módulo de rotação de cultivos – Nesse módulo, respeitando uma ordem pré-selecionada em um *template*, é simulada a rotação de cultivos.

O CROPSYST é um modelo que possui uma ampla gama de atuação, sendo empregado em áreas relacionadas ao manejo BENLI *et al.* (2007), às mudanças climáticas MORIONDO *et al.* (2011), à espacialização para interação com outros modelos STÖCKLE, C.O. *et al.* (2014), dentre outras.

3.1.6 O Modelo INFOCROP

O INFOCROP é um modelo de sistema agrícola dinâmico, que trabalha de forma mecanística e modular, e tem como seu principal objetivo simular a produção de um determinado cultivo em função dos fatores ambientais e de gestão agrícola.

Nesse modelo a produtividade do cultivo é influenciada, em ordem crescente, pelos fatores meteorológicos, do solo e pelas doenças e pragas. Há no INFOCROP duas opções de cálculo da evapotranspiração, a metodologia de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) e a metodologia de FAO 56-Penman-Monteith (ALLEN *et al.*,1998), (AGGARWAL *et al.*,2006).

Ainda segundo AGGARWAL *et al.* (2006), seus módulos podem ser subdivididos como:

- (1) Crescimento e Desenvolvimento do Cultivo – Nesse conjunto de módulos são simulados o crescimento da área foliar, a fotossíntese, a fenologia, a alocação e a redistribuição do nitrogênio, dentre outros processos biofísicos que estão ligados ao crescimento e ao desenvolvimento;
- (2) Água no solo e Evapotranspiração – Já nesse conjunto de módulos são simulados os efeitos da água, do nitrogênio e da temperatura no crescimento e desenvolvimento do cultivo, sendo simulados por exemplo, a evapotranspiração, o balanço de água no solo e o processo de escoamento;
- (3) Nitrogênio no Solo – Nesse conjunto de módulos é simulado o balanço de nitrogênio no solo;
- (4) Carbono no solo – Neste conjunto de módulos é simulada a dinâmica do carbono no solo, sendo calculados, dentre outros, os processos da mineralização e de emissão de metano para atmosfera. Além disto, nesse conjunto há um índice para o cálculo potencial do aquecimento global;
- (5) Interações entre o cultivo e as pragas – Nesse conjunto são simuladas as perdas dos cultivos em função da incidência de pragas e doenças.

A versatilidade desse modelo pode ser observada por meio dos trabalhos de EBRAYI *et al.* (2007), no qual foi simulado o balanço do nitrogênio, e de KRISHNAN *et al.* (2007), em que foram feitas análises do impacto do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e do aumento da temperatura sobre a agricultura.

3.1.7 O Modelo CROPWAT

Como a maioria dos modelos descritos neste capítulo, o modelo de agendamento de irrigação CropWat também foi desenvolvido durante a década de 1990 por SMITH

(1992) e faz parte do quadro de modelos disponibilizados e pertencentes a *Food and Agriculture Organization* (FAO). Esse modelo, diferentemente dos modelos descritos anteriormente, é um modelo mais simples, pois possui uma menor quantidade de processos que são passíveis de serem simulados. O CROPWAT tem como objetivo fazer o planejamento e gestão das necessidades hídricas de uma determinada cultura.

O Modelo CROPWAT possui apenas um método de cálculo da evapotranspiração: o método FAO56-Penman-Moenteith (ALLEN *et al.*, 1998).

A frequência de entrada dos dados neste modelo é mensal, mas ainda podem ser selecionadas variações de frequência fazendo simulações com dados diários e decendiais (de 10 em 10 dias). O modelo trabalha de forma modular e seus módulos são divididos da seguinte forma:

- (1) Módulo “Climate/ ET_0 ” - Nesse módulo são feitas as estimativas de evapotranspiração de referência (ET_0) e da radiação solar, em função da temperatura ($^{\circ}C$), da velocidade do vento ($m\ s^{-1}$), da localização (latitude e longitude), da insolação (horas) e da umidade relativa (%);
- (2) Módulo “Rain” - Nesse módulo é calculada a precipitação efetiva, em função dos dados de precipitação acumulada (mm/mês);
- (3) Módulo “Crop” - Nesse módulo são fornecidos os dados requeridos pelo modelo sobre a cultura em diferentes estádios fenológicos, e os dados de plantio do cultivo;
- (4) Módulo “Soil” – No módulo do solo são inseridas as variáveis referentes ao solo (umidade total contida no solo, taxa de infiltração da chuva no solo, profundidade máxima de sistema radicular, diminuição de umidade inicial no solo, e umidade inicial no solo) e são feitos os cálculos iniciais referentes a disponibilidade inicial de umidade no solo;
- (5) Módulo “Crop water requirements” - Nesse módulo é calculada a evapotranspiração da cultura (ET_c) e, através do cálculo entre a ET_c e a precipitação efetiva, é obtida a necessidade de irrigação para o cultivo dada em $mm\ dia^{-1}$;
- (6) Módulo “Schedule” – Nesse módulo é simulado o balanço de água no solo na base diária, e assim é possível analisar técnicas de gestão da irrigação com os melhores dias para se irrigar, a eficiência da chuva, o balanço de umidade no solo, o impacto na produção do fornecimento inadequado de água para as

culturas cultivadas em sequeiro; e também são simuladas e apresentadas neste módulo as necessidades hídricas do cultivo estudado;

- (7) Módulo “*Crop Pattern*” – Nesse módulo são fornecidas as datas de plantio e colheita e a extensão da área cultivada de cada cultura analisada, podendo apresentar apenas um cultivo ou vários cultivos diferentes;
- (8) Módulo “*Scheme*” - No módulo “*Scheme*” são simuladas as necessidades de irrigação de cada cultivo, com o balanço de irrigação para todos os cultivos analisado, a porcentagem de área total que deve ser irrigada e a porcentagem da necessidade de irrigação para o caso de já haver irrigação na área estudada;

Esse modelo foi utilizado por TAYT-SOHN *et al.* (2018) para auxiliar na avaliação da aptidão climática do cultivo da cana-de-açúcar para a mesma região de expansão que está sendo estudada nesta tese. Além disso, esse modelo foi utilizado FACHINELLI *et al.* (2015) para a análise da pegada hídrica da mesma bacia estudada nesta tese. Outros trabalhos sobre a temática da necessidade hídrica para diversas culturas podem ser citados ZEMA *et al.* (2012); HERNANDES *et al.* (2013); BOURAIMA *et al.* (2015); PACETTI *et al.* (2015).

3.1.8. O Modelo DSSAT-CSM

O DSSAT é um modelo de sistema agrícola amplamente conhecido pela comunidade científica mundial, sendo utilizado em mais de 150 países. É um modelo mecanístico dinâmico que trabalha de forma modular (Figura 6) e possui uma base de dados com 42 cultivos diferentes disponíveis para simulação (DSSAT, 2015). Foi entre a década de 1980 e meados da década de 1990, que um grupo internacional de cientistas criou o modelo DSSAT, como um dos frutos do projeto “*International Benchmark sites Network for Agrometeorology Transfer*”, (IBSNAT, 1993; UEHARA & TSUJI, 1998).

No artigo feito por JONES *et al.* (2003) é citado que o modelo de sistema agrícola DSSAT sofreu algumas modificações devido às revisões que foram feitas ao longo dos anos. Neste artigo inclusive é apresentado um novo modelo de sistema agrícola (CSM) que se tornou a base do modelo DSSAT. O CSM incorpora todas as culturas e, usando apenas um modelo de solo, o modelo DSSAT passou a ser conhecido como DSSAT-CSM, o qual tem como objetivo simular o crescimento, o desenvolvimento e a produção de uma cultura, como esquematizado pela Figura (6).

O modelo DSSAT conta ainda com uma base global de dados meteorológicos, edáficos e de gestão do cultivo. Normalmente, os dados de entrada devem estar em uma frequência diária, podendo também ser em uma frequência horária dependendo da demanda e da análise que se deseja fazer sobre determinado cultivo (JONES *et al*, 2003).

Há no DSSAT-CSM programas de validação de dados, em que os dados simulados são comparados estatisticamente aos dados observados que se encontram na base de dados do modelo. O DSSAT – CSM também tem um módulo de risco econômico e um de risco de impacto ambiental, sendo os dois módulos relacionados à questão da irrigação, dos fertilizantes, da gestão de nutrientes, das mudanças climáticas, do sequestro de carbono, e da gestão agrícola (JONES *et al*, 2003).

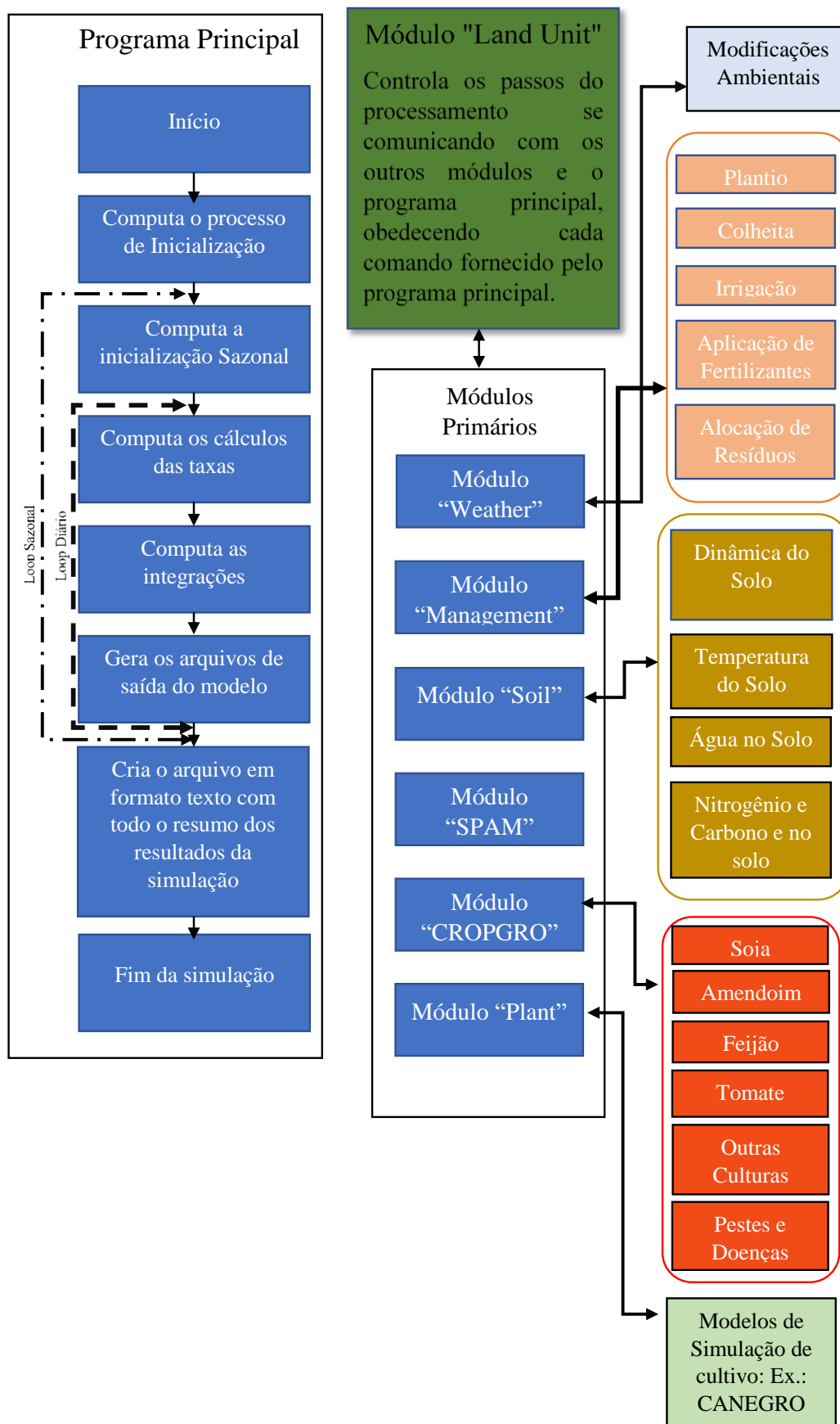


Figura 6: Demonstrativo do esquema de funcionamento do modelo agrícola DSSAT. Fonte: Tradução própria baseada em JONES *et al.* (2003).

No modelo DSSAT-CSM existem três métodos para o cálculo da evapotranspiração:

- (1) O método PRIESTLEY & TAYLOR (1972) segundo RITCHIE (1972), detalhado por RITCHIE & OTTER (1985) e por JONES & RITCHIE (1991) e computado por JONES & KINIRY (1986);
- (2) O método PENMAN modificado (DOOREMBOS & PRUITT, 1977);
- (3) O método de FAO-56-Penamn - Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), (JONES *et al.*, 2003).

Uma observação importante a ser feita acerca do método de PRIESTLEY-TAYLOR (1972), contido no DSSAT, é que ele apresenta parâmetros diferentes daqueles apresentados em PRIESTLEY-TAYLOR (1972). Mesmo em RITCHIE (1972) e em JONES & KINIRY (1986) não foi possível encontrar esses parâmetros. Assim, em contato com o próprio RITCHIE por e-mail, ele me explicou que esses parâmetros foram conseguidos de forma empírica.

De acordo com JONES *et al.* (2001), existem dois níveis de módulos no DSSAT: há aqueles que permitem que novos módulos de cultura sejam adicionados ao modelo (primeiro nível), desde que sejam obedecidas as premissas do modelo; e há aqueles módulos que já existem dentro do modelo (segundo nível). Nesse segundo nível, Figura (6), os módulos podem ser divididos como:

- (1) “DSSAT-CSM” – O CSM é o principal módulo do modelo, responsável por controlar os processos de inicialização e finalização, o “*looping*” temporal, e condicionar os módulos que serão utilizados de acordo com os dados de entrada;
- (2) Módulo “*Land Unit*” – Esse módulo serve como uma controladora, fazendo a gestão entre todos os módulos que participam do sistema de cultivo, ou seja, criando uma interface entre os módulos de aplicação e o do módulo do cultivo simulado, gerindo o momento em que cada módulo e submódulo deve ser chamado, além de fazer o controle das informações que chegam e vão para o módulo principal do modelo;
- (3) Módulo “*Weather*” – Nesse conjunto de módulos são lidas e calculadas as variáveis meteorológicas que serão utilizadas na simulação por outros módulos, como no caso do balanço da radiação solar;

- (4) Módulo “*Soil*” – Esse conjunto de módulos computa os dados de solo que são colocados como dados de entrada do modelo e simula as variações de temperatura, os processos ligados à dinâmica hidrológica no solo, como o escoamento, a infiltração da água no solo, o conteúdo disponível de água no solo, entre outros, e também os processos relacionados ao balanço do carbono e nitrogênio no solo, como a taxa de decomposição, a taxa de concentração de nitrato e amônia, os fluxos de nutrientes entre várias camadas de solo etc;
- (5) Módulo “*SPAM (Soil-Plant-Atmosphere)*” – O Módulo solo-planta-atmosfera equaciona processos ligados a interação entre o solo, a planta e a atmosfera, calculando por exemplo, a temperatura do solo por camada, a competição entre as plantas por recursos, os processos do balanço de energia para a evaporação e transpiração etc;
- (6) Módulo “*Plant*” – De forma geral, nesse módulo é simulado o crescimento, o desenvolvimento e a produção de um determinado cultivo, incluindo processos fenológicos, ligados à fotossíntese, entre outros, utilizando para tanto, modelos de cultivo individuais, como é o caso do modelo CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991, SINGELS & BEZUIDENHOUT, 2002 *apud* SINGELS *et al.*, 2008).
- O modelo CANEGRO é um dos módulos responsáveis pela simulação do crescimento, do desenvolvimento, do balanço da água (relação solo-planta-atmosfera) e da produção da cana-de-açúcar dentro do modelo de sistema agrícola DSSAT-CSM, seu funcionamento dentro do DSSAT-CSM pode ser observado através da Figura (7) (SINGELS *et al.*, 2008).
- O modelo CANEGRO foi extensivamente utilizado em pesquisas, e a primeira vez que ele foi adicionado ao DSSAT foi quando o DSSAT estava em sua versão 3.5. O modelo CANEGRO sofreu modificações e, por conta disto, foi adicionado novamente ao DSSAT, o qual já estava na versão 4.5 (SINGELS *et al.*, 2008);
- (7) Módulo “*Management Operations*” – Nesse módulo, baseado nos valores fornecidos ou simulados pelo DSSAT-CSM, é calculada a data de plantio e de colheita, a necessidade de irrigação diária, a quantidade necessária de fertilizantes, dentre outros.

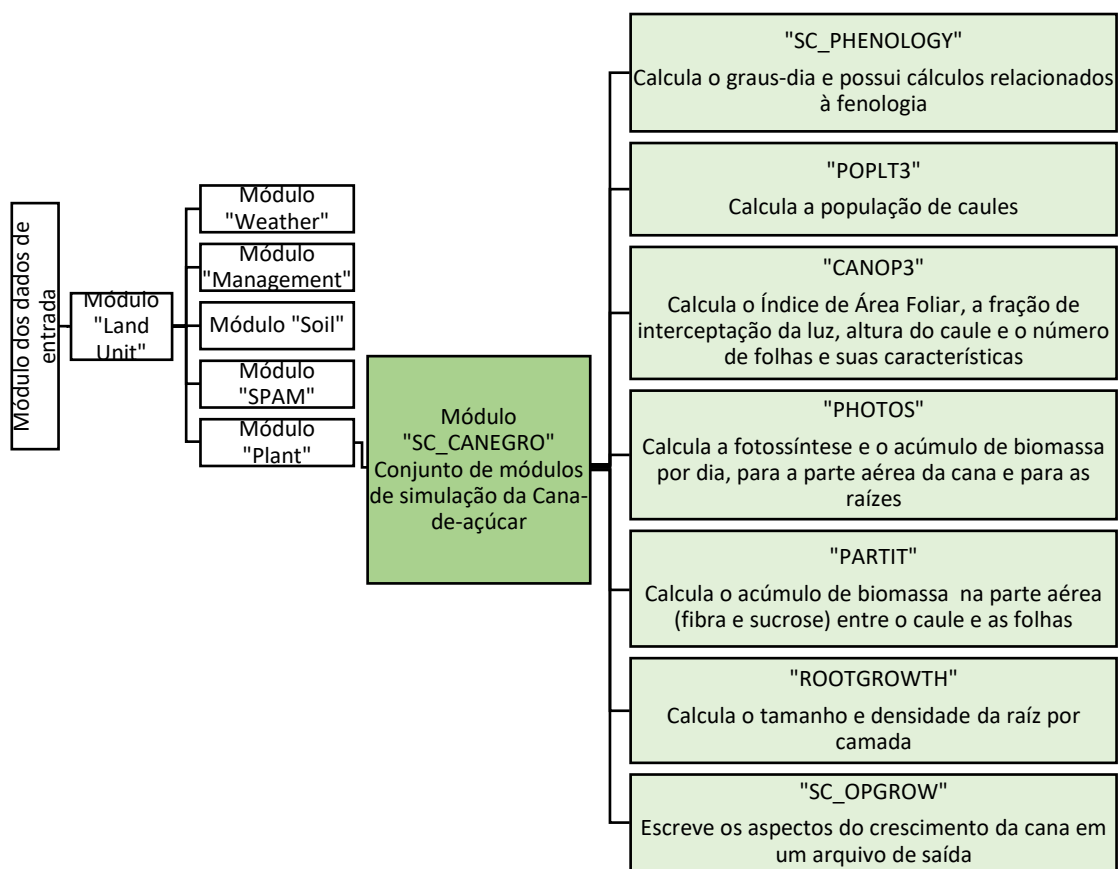


Figura 7: Fluxograma dos processos do modelo CANEGRO dentro do modelo DSSAT-CSM. Fonte: Tradução Própria baseado em SINGELS *et al.* (2008).

O modelo DSSAT-CSM, por conta da quantidade de cultivos e funções, é utilizado em muitas áreas, não só a da simulação de produção de uma determinada cultura, como é o caso do trabalho feito por MARIN *et al.* (2013) na área de mudanças climáticas e o impacto sobre a agricultura, ou ainda na área de sensibilidade do modelo quanto as parametrizações relacionadas ao cultivo, e.g. MARIN *et al.* (2011), ou na análise do impacto ambiental ocasionado por diferentes técnicas de gestão agrícola ligados ao manejo do nitrogênio e administração da água, e.g. VAN DER LAAN *et al.* (2015).

3.2 Critérios para a Seleção do Modelo de Sistema Agrícola

Segundo WHITE *et al.* (2011), alguns critérios são recomendados para melhorar a avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre os sistemas agrícolas. Um desses critérios está relacionado à escolha do modelo de sistema agrícola, sendo recomendado que haja uma justificativa de seleção do modelo de simulação e uma descrição detalhada sobre ele.

Com isso, foram levantadas algumas premissas, com a finalidade de justificar a seleção do modelo e elas são tanto de cunho prático, quanto de cunho teórico.

A primeira premissa é a de que a escolha do modelo fosse baseada em um modelo de sistema agrícola que simulasse especificamente a cultura da cana-de-açúcar, pois como mostrado na introdução esta tese tem como objetivo geral avaliar a expansão desta cultura.

A segunda premissa está relacionada com o cálculo da evapotranspiração, o modelo necessariamente precisa possuir o cálculo da evapotranspiração em seu código.

A terceira premissa é a de que o modelo de sistema agrícola deveria ser amplamente utilizado, possuindo estudos com simulações inclusive para o Brasil.

A quarta premissa está relacionada ao código do modelo que deve ser aberto, para que fosse possível modifica-lo e assim implementar uma equação modificada.

A quinta premissa é a facilidade de contato com os desenvolvedores do modelo, para sanar dúvidas que poderiam surgir acerca da implementação da equação modificada.

O sexto critério está relacionado com a questão da capacidade do modelo em trabalhar com cenários de maior concentração de CO₂ na atmosfera.

Assim, levando em conta todos os critérios o modelo DSSAT/CANEGRO foi o escolhido nesta tese para sofrer a modificação do cálculo da evapotranspiração e, posteriormente ser utilizado para a formulação do ZAPAC.

CAPÍTULO IV

4 O ZONEAMENTO COMO FERRAMENTA DO PLANEJAMENTO TERRITORIAL E AMBIENTAL

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018), o planejamento territorial tem como preceito o desenvolvimento do País, analisando cenários atuais e projetados para que os instrumentos existentes, na atual legislação, sejam capazes de traçar estratégias, relacionadas à distribuição territorial das atividades produtivas e dos equipamentos de maneira mais eficiente, bem como realizar negociações com atores de relevância, e ainda ser capaz de prover subsídios para as problemáticas existentes de cunho socioambiental.

De forma geral, o zoneamento pode ser definido como um instrumento de fundamental importância do planejamento territorial, onde zonas condicionadas e dotadas de qualificações específicas são criadas em uma determinada área. Esse instrumento normalmente é utilizado pelo governo como ferramenta de políticas públicas, como um recurso de auxílio na criação e execução de planejamentos governamentais, ou como instrumento de diversas normas e leis (SILVA, 2007; VAN RIJ & KORTHALS ALTES, 2008).

Outra definição encontrada para zoneamento está em nossa legislação, na Lei nº 9.985/2000 que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Nessa lei, o zoneamento é definido como um instrumento de ordenamento territorial das unidades de conservação, que tem como finalidade trazer eficiência e harmonia nas ações voltadas para os objetivos destas unidades.

Normalmente, um zoneamento pode ser justificado quando as externalidades negativas precisam ser reduzidas e o custo da formulação do zoneamento fica abaixo do valor requerido para a redução dessas externalidades (BINSWANGER *et al.*, 1995)

Entretanto, muitas vezes o zoneamento vai contra os incentivos econômicos, principalmente os zoneamentos que são voltados para a área de meio ambiente e para a área social. Necessitando assim, de subsídios e apoio político para que possa ser implementado (BARROWS & NEUMAN, 1990 *apud* BINSWANGER *et al.*, 1995).

4.1 Tipos de Zoneamento

Existem diversas abordagens dentro da temática do zoneamento, tendo seu enfoque voltado para a região costeira, a agricultura, a região urbana e até as regiões oceânicas. Segundo SILVA (2007), todos os tipos de zoneamento têm uma função ambiental através da regulação territorial que se traduz em maior eficiência do uso dos recursos da área que sofreu zoneamento.

Dessa forma, unindo as informações obtidas em JIMÉNEZ-RUEDA *et al.* (1995); FAO (1996); PEREIRA *et al.* (2002); SILVA (2007); SÃO PAULO (2008), FIORILLO (2013), WOLLMANN & GALVANI (2013); MMAa (2014); MMAb (2014); MMA (2016), MMAb (2018), MAPA (2018); serão apresentadas a seguir os principais tipos de zoneamento:

- Zoneamento ambiental (ZA) – Esse instrumento de delimitação territorial baseia-se no desenvolvimento sustentável. O ZA tem como objetivo o ordenamento de uma região fundamentando-se no desenvolvimento industrial, na conservação ambiental e na manutenção da qualidade de vida para as gerações atuais e futuras. Ele é um instrumento integrante da Política Nacional do Meio Ambiente (lei federal nº 6.938/1981) e, após duas décadas, foi regulamentado para implementação em todo o território nacional através do decreto federal nº 4.297/2002, evoluindo para Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE);
- Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) – É um instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente regulamentado pelo decreto federal nº 4.297/2002. Ele tem como intuito o auxílio da viabilização do desenvolvimento sustentável como uma consequência do desenvolvimento socioeconômico em conjunto com a proteção ao meio ambiente. Para perfazer tal objetivo, esse instrumento atua na área do ordenamento territorial de forma racional com o reconhecimento e análise dos meios físico, socioeconômico e jurídico-institucional, além de atuar como ferramenta de formulação de cenários que auxiliam o poder público e privado quanto a planos, programas, projetos e atividades, bem como no diagnóstico de medidas corretivas para os problemas existentes nas unidades zoneadas;
Vale ressaltar que o ZEE teve uma aplicação de grande importância estratégica para o País e ela foi no estudo do macro zoneamento da Amazônia Legal. Ele, após o decreto federal nº 7.378/2010, começou a integrar a agenda do governo

para o desenvolvimento regional, sinalizando estratégias sustentáveis para os tomadores de decisão e para a sociedade.

Além disto, o ZEE fornece subsídios para a avaliação de impacto ambiental (AIA), tanto em termos da identificação do alcance territorial do projeto e os possíveis impactos ao meio ambiente da região que se almeja desenvolver o projeto, quanto na averiguação de alternativas para a implementação do projeto tendo em vista os impactos ambientais.

Alguns exemplos relevantes ocorreram nos principais estados integrantes da bacia hidrográfica do rio Paranaíba: o Macro Zoneamento Agroecológico e Econômico do estado de Goiás (MACROZAEE-GO) e o ZEE do estado de Minas Gerais.

O MACROZAEE-GO teve como base o ZEE, adotando suas diretrizes metodológicas e enfocando também no setor agropecuário e no desenvolvimento sustentável. No MACROZAEE-GO foram observados mapas das zonas de aptidão agrícola, de vulnerabilidade ambiental, de desenvolvimento socioeconômico, dentre outros mapas (SIEG, 2018).

Já o ZEE de Minas Gerais teve sua aplicação voltada para o diagnóstico de potencial social e para o diagnóstico da vulnerabilidade natural, avaliando a delimitação das zonas em função da integridade da flora/fauna, da susceptibilidade geológica à contaminação das águas subterrâneas, das condições climáticas, das atividades econômicas e da utilização da terra etc. (SCOLFORO *et al.*, 2007).

- Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEC) – Previsto na Lei nº 7.661/1988, assim como o ZEE, ele tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento sustentável das zonas costeiras, incluindo a faixa terrestre e a marítima. Em vista disso, por meio do planejamento territorial, ele serve como ferramenta ao monitoramento, ao licenciamento, à fiscalização e à gestão das zonas costeiras.

O ZEEC também exerce papel fundamental no licenciamento ambiental, pois está previsto no 33º art. da Lei nº 5.300/2004 que para as obras e serviços públicos na faixa costeira devem seguir as regras estabelecidas no ZEEC;

- Zoneamento Socioeconômico-Ecológico (ZSEE) – Esse tipo de zoneamento é voltado para os estados de Mato Grosso e Rondônia e possui os mesmos objetivos do ZEE, porém dá-se maior ênfase à questão social;
- Zoneamento Agrícola (ZAG) – Provavelmente o zoneamento mais complexo de todos os zoneamentos que são voltados para a agricultura. A metodologia do ZAG baseia-se nos critérios do solo, do clima, socioeconômicos e da cultura estudada, ordenando de forma racional as culturas mais rentáveis frente aos critérios culturais, ambientais e econômicos da região estudada.
- Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) – É um instrumento técnico da Política Agrícola que atua em nível municipal e tem como objetivo minimizar os riscos da agricultura quanto às adversidades climáticas, por meio da formulação de calendários agrícolas de plantio das culturas estudadas, levando em consideração os ciclos dos cultivares e os tipos de solo. Na atualidade o estudo do ZARC já é empregado em 24 estados do Brasil, abarcando um total de 15 culturas de ciclo anual e 24 permanentes.

MIDITIERI & MEDEIROS (2008); ASSAD *et al.* (2008) citam que o ZARC é uma ferramenta importante no auxílio da avaliação de concessão de crédito agrícola. Ainda segundo ASSAD *et al.* (2008), o ZARC está presente em inúmeras resoluções da legislação brasileira, e impactou substancialmente na redução de sinistros ocasionados por adversidades meteorológicas. PINTO *et al.* (2011), por exemplo, cita a questão do Programa de Zoneamento de Riscos Climáticos no Brasil, que está relacionado às políticas públicas dos Ministérios da Agricultura e do Desenvolvimento Agrário, e entrou em vigor em 1996. Por meio deste programa, houve a possibilidade de indicação das zonas aptas ao plantio e a formulação de calendários agrícolas a serem requeridos no estudo da disponibilização de crédito e/ou no seguro agrícola;

- Zoneamento Agroecológico (ZAE) – O ZAE fundamenta-se no ordenamento territorial ao nível federal e estadual, focando principalmente, no potencial e nas limitações da produtividade de uma cultura em relação a uma área zoneada, considerando, o tipo e o uso do solo, o clima, a cultura e o relevo. O produto do ZAE fornece informações que são aplicadas em áreas como: o desenvolvimento

sustentável, a mitigação da degradação do solo, a avaliação de estratégias para aumentar a eficiência do uso do solo, o planejamento ambiental e agrícola etc.

Um dos estudos do ZAE de grande importância aplicados no Brasil é o Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar para a produção de etanol e açúcar, o qual proporcionou, aos tomadores de decisão, informações técnico-científicas quanto à expansão e à produção sustentável de cana-de-açúcar na União, auxiliando o planejamento governamental, a formulação de políticas públicas, e fornecendo informações aos órgãos públicos/privados (MANZATTO *et al.*, 2009).

- Zoneamento Agroclimático ou Zoneamento de Aptidão Agroclimática (ZAPAC) – Responsável por avaliar e estabelecer zonas de acordo com a aptidão e potencial da cultura estudada em relação ao clima. Além disso, fornece informações quanto às possíveis datas de plantio. O ZAPAC pode ser feito em escala macroclimática ou regional, sendo a escala regional a mais recomendada, devido à quantidade de detalhamento dada ao zoneamento.

Um dos trabalhos pioneiros de ZAPAC da cultura da cana-de-açúcar para todo o Brasil é o trabalho feito por CAMARGO *et al.* (1977) *apud* PEREIRA *et al.* (2002), no qual foram utilizadas as variáveis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e do balanço hídrico (mm) para definir os limites de aptidão para cada zona, variando entre: apta, marginal, marginal a inapta, e inapta;

- Zoneamento Industrial (ZI) – Desde a década de 1970 o governo já sinalizava a importância do zoneamento industrial, como apontado na Lei nº 6.151/1974. Já no ano seguinte, por meio da Lei nº 1.413/1975, foi prevista a implementação do zoneamento urbano para áreas industriais com alto grau de poluição. Somente na década seguinte as diretrizes do zoneamento industrial foram previstas por lei (Lei nº 6.803/1980). O ZI tem como intuito zonear regiões industriais, auxiliando no controle das atividades que impactam o meio ambiente e a sociedade, sendo as zonas classificadas em: estritamente industrial, predominantemente industrial, e de uso diversificado. Para o caso das zonas estritamente industriais, é preconizada a implantação de fábricas cujas atividades podem causar risco à saúde, ao bem-estar e à segurança da sociedade. Já no caso específico de áreas industriais que apresentam alto nível de poluição, a metodologia do ZI seguirá o esquema do Zoneamento Urbano, como previsto na Lei nº 6.803/1980.

Uma das aplicações desse zoneamento dá -se no licenciamento ambiental para implantação, operação e aumento da área usada pela fábrica em regiões de alto nível de poluição, como previsto no artigo 9º da Lei 6.803/80;

- Zoneamento Urbano (ZU) – O ZU é um dos principais instrumentos do planejamento urbanístico. Sua atuação é voltada para os municípios e tem como objetivo atentar para o uso e a ocupação do solo. Traçando zonas de acordo com os fatores de equilíbrio entre a ocupação e a infraestrutura existente, de sensibilidade do terreno quanto à ocupação, de conservação ambiental, de preservação de áreas de interesse cultural etc;
- Etnozoneamento (EZ) – É um instrumento da Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas (PNGATI) referente ao decreto federal nº 7.747/2012. Neste zoneamento é feito o planejamento territorial de regiões ocupadas pelos povos indígenas e são levadas em consideração as regiões que possuem relevância ambiental e étnica segundo levantado em reuniões internas com a própria comunidade indígena;
- Zoneamento Geoambiental (ZGA) – É uma ferramenta capaz de levantar e avaliar sistematicamente informações do meio biótico, abiótico (*e.g.* litologia, morfoestruturas), antrópico e suas interações. Seguindo esses critérios, as zonas homogêneas são delimitadas, fornecendo subsídios à análise das potencialidades e limites do meio físico em função da adequação das necessidades socioeconômicas e das possibilidades física e ambientais;
- Zoneamento Agroambiental (ZAA) – O ZAA foi implementado em 2008 para o setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo, e teve como finalidade analisar as possíveis áreas de expansão da cana-de-açúcar dentro do estado. Para tanto, são avaliados os níveis de adequação das terras para o cultivo da cana-de-açúcar, no que se refere às condições climáticas, à qualidade do ar, ao relevo, ao solo, à disponibilidade e à qualidade das águas, às áreas de proteção ambiental e às unidades de conservação¹⁸.

¹⁸Segundo MMA (2019), as Unidades de Conservação podem ser definidas como: territórios de relevância ambiental, e tem como função a preservação ambiental, assegurando as especificidades ambientais de cada região zoneada para esse fim.

4.2 O Zoneamento como Ferramenta de Auxílio à Expansão

MEIRELES *et al.* (2007) menciona que o zoneamento já serve como ferramenta para a agricultura há mais de quatro décadas, porém apenas no início da década de 1990 é que ele foi empregado de forma espacializada com técnicas de sistemas de informação geográfica (SIG), em um estudo voltado para o cultivo do café realizado por ASSAD *et al.* (1993).

Atualmente, muitos trabalhos nessa temática, que são voltados para a área agrícola, exploram o zoneamento tanto para o cenário climatológico, *e.g.* SEYDIMA *et al.* (2001); MANZATTO *et al.* (2009), quanto para cenários de mudanças climáticas, *e.g.* ASSAD *et al.* (2004); ZULLO *et al.* (2006); CAMARGO (2010).

A aptidão agroclimática sob influência de cenários de mudanças climáticas pode possuir respostas nas quais muitas culturas em expansão serão direcionadas para locais que sejam viáveis para sua sobrevivência e para uma boa produtividade, muitas vezes considerando a segurança hídrica e questões ambientais (TAYT-SOHN *et al.*, 2014).

No trabalho desenvolvido por TRNKA *et al.* (2009), é observado, inclusive, que a realização de estudos de zoneamento agroclimáticos sobre influência de cenários de mudanças climáticas é de extrema importância para o planejamento agrícola, ambiental e governamental, porquanto traça estratégias sob a ótica de possíveis mudanças que podem ocorrer na produção agrícola da cultura estudada. Ademais é mostrado nesta pesquisa que as mudanças climáticas podem ser tão impactantes para a região Central da Europa, que sob essas condições, os zoneamentos mais antigos necessitariam ser atualizados.

A aplicação do zoneamento na agricultura pode ir além da análise de uma cultura existente na região do zoneamento e, analisar também, possíveis áreas de expansão da cultura estudada, como nos trabalhos desenvolvidos para cana-de-açúcar realizados por WREGE *et al.* (2005); SÃO PAULO (2008); MANZATTO *et al.* (2009), no trabalho desenvolvido para o milho de segunda safra realizado por LANDAU *et al.* (2015); na pesquisa da avaliação de áreas potenciais para o plantio da soja e do milho, na região do Piauí, elaborada por DE ANDRADE JÚNIOR *et al.* (2001).

Podendo ser aplicadas também nas pesquisas de zoneamento sob a influência de cenários de mudança climática feitas por ASSAD *et al.* (2004), no qual são avaliadas as áreas aptas ao plantio do café através do ZAPAC; por COLLICCHIO *et al.* (2015) realizou-se o ZAPAC da cana-de-açúcar no estado do Tocantins, apresentando

avaliações para regiões de potencial expansão; por ZULLO *et al.* (2018) que avaliou através do ZARC, as áreas de expansão da cana-de-açúcar do Centro-Sul brasileiro, sob a influência do cenário mais pessimista de mudanças climáticas apresentado pelo último relatório do IPCC.

4.3 Zoneamentos Direcionados para a Cultura da Cana-de-Açúcar

Alguns tipos de zoneamento tiveram seu foco voltado para a cana-de-açúcar. No ZAE-CANA por exemplo, essa cultura foi analisada para todo o Brasil sobre diversas óticas. A aptidão climática (clima corrente) da cana-de-açúcar (Tabela 1), a aptidão pedológica, a aptidão edafoclimática e o uso da terra foram avaliados.

Tabela 1: Representação dos critérios utilizados na metodologia do ZAE para a delimitação das zonas quanto à aptidão climática. Fonte: MANZATTO *et al.* (2009).

CLIMA	DESCRIÇÃO
A	Baixo Risco-Irrigação de Salvamento Indicada-Área indicada <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura Média Anual > 19°C; • ISNA¹⁹ > 0.6; • GEADA < 20%; • Deficiência Hídrica < 200mm
B	Baixo Risco- Sem limitação ao cultivo-Área indicada <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura Média Anual > 19°C; • ISNA > 0.6; • Geada < 20%; • 200 mm < Deficiência Hídrica < 400mm
C	Carência Térmica ou alto risco de geada -Área não indicada <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura Média Anual < 19°C ou Geada >20%; • ISNA > 0.6; • Geada < 20%; • 200 mm < Deficiência Hídrica < 400 mm
D	Irrigação intensiva imprescindível -Área não indicada <ul style="list-style-type: none"> • ISNA < 0.6; • Deficiência Hídrica < 400 mm
E	Excesso de água com prejuízo para maturação e colheita – Área não indicada <ul style="list-style-type: none"> • Período seco < 3 meses

¹⁹ ISNA – Índice de Satisfação das Necessidades de Água.

Por meio do ZAE-CANA, foi formulado um mapa com todas as zonas aptas ao plantio da cana-de-açúcar no País e foi observada uma área apta ao plantio de aproximadamente 64 milhões de hectares (Figura 8), (MANZATTO *et al.*, 2009).

Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar Áreas aptas por classes de aptidão no Brasil



Figura 8: Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar por zonas de aptidão, com zonas de alta aptidão (em verde escuro), zonas de média aptidão (em verde claro) e zonas de baixa aptidão (em amarelo), os biomas da Amazônia e Pantanal foram consideradas como áreas que não deveriam ocorrer a expansão. Fonte: MANZATTO *et al.* (2009).

O Zoneamento Agroambiental também foi feito para o setor sucroalcooleiro. Nele foram observadas as áreas aptas para expansão do cultivo da cana-de-açúcar, em relação aos fatores ambientais, agrícolas e sociais, para o principal estado produtor de cana-de-açúcar no País (Figura 9), (SÃO PAULO, 2008).

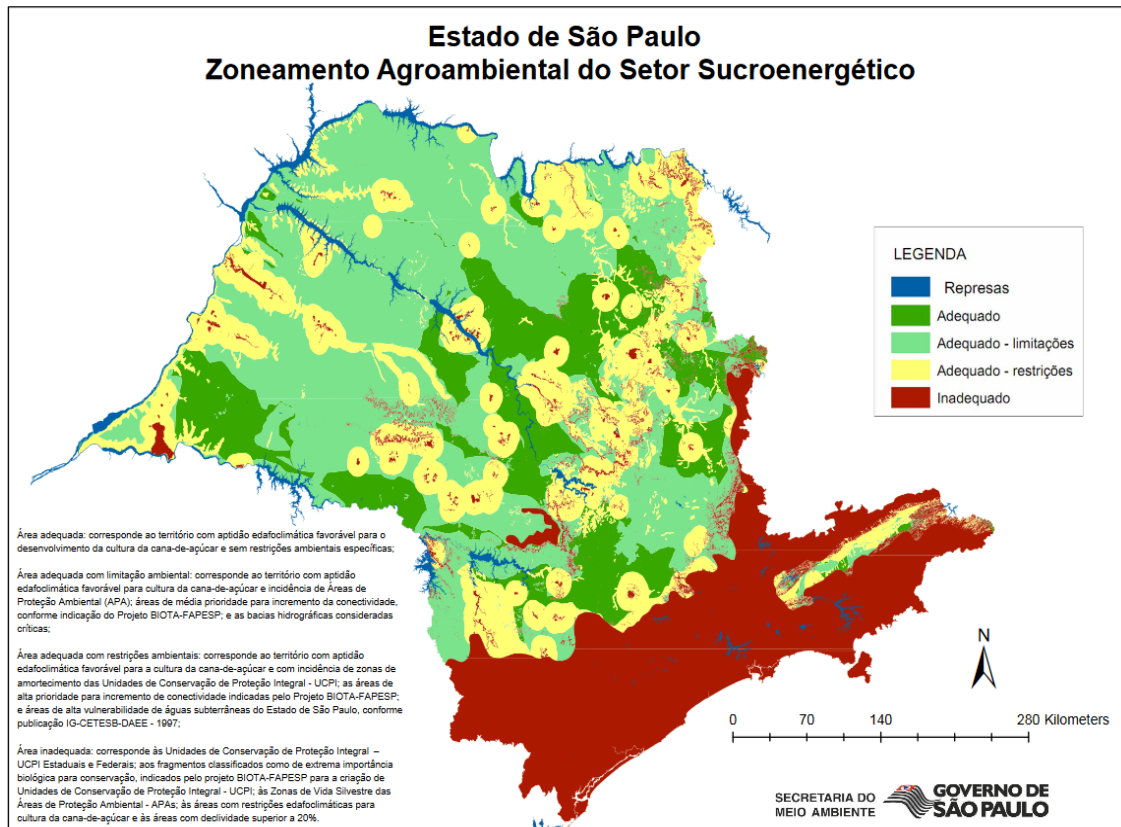


Figura 9: Mapa do Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroenergético do estado de São Paulo, com a delimitação das zonas, as quais são classificadas em: Adequadas (em verde bandeira); adequadas com limitações (em verde claro), adequadas com restrições (em amarelo) e inadequadas (em vermelho). Fonte: SÃO PAULO (2008).

Outro zoneamento feito para a cana-de-açúcar no estado de São Paulo foi formulado por BRUNINI *et al.* (2008), porém, nesse caso, não foram consideradas variáveis sociais, econômicas e ambientais, sendo feito o zoneamento edafoclimático, o qual levou em consideração o tipo de solo e os aspectos climáticos (Figura 10).

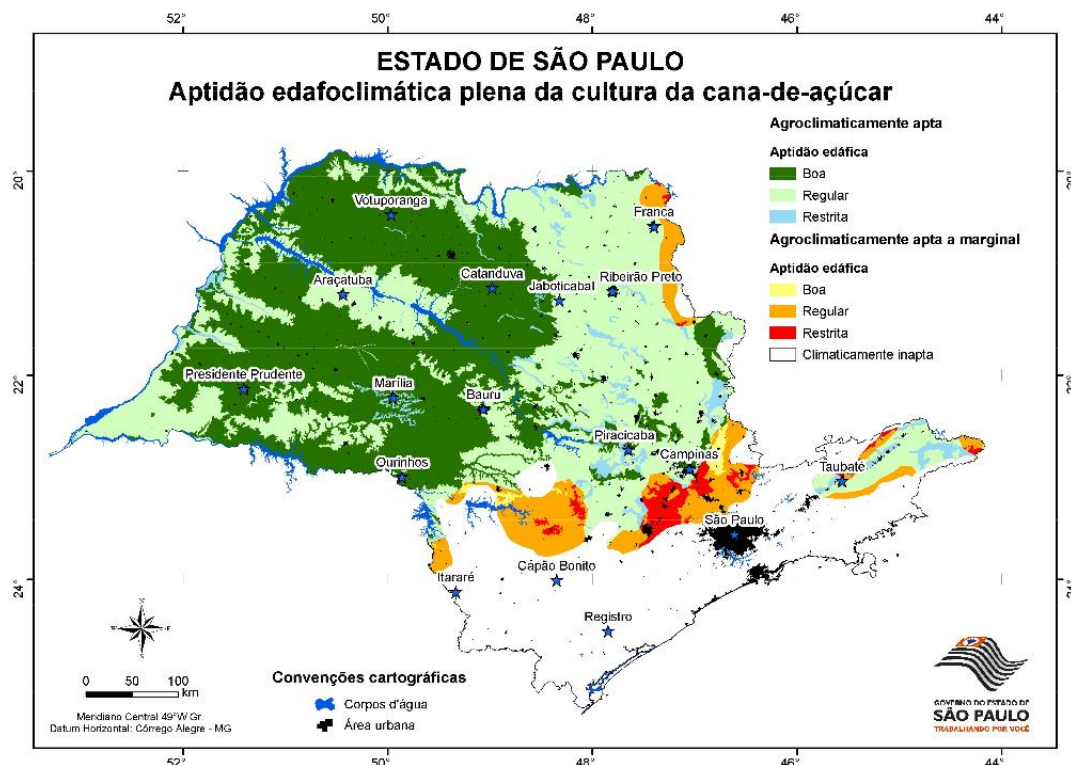


Figura 10: Zoneamento Edafoclimático da cana-de-açúcar, com as classes das zonas variando entre Agroclimatologicamente apta com aptidão edáfica boa (em verde escuro), regular (em verde claro), restrita (em azul), agroclimaticamente apta a marginal com aptidão edáfica boa (em amarelo), regular (em laranja), restrita (em vermelho) e climatologicamente inapta (em branco). Fonte BRUNINI *et al.* (2008)

Já no trabalho feito por ALMEIDA *et al.* (2013), o zoneamento agroclimático foi aplicado para a cultura da cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais, o qual tem sua região sudoeste integrando a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. O trabalho utilizou uma técnica metodológica diferente para a obtenção de informações utilizadas no zoneamento, usando de regressões múltiplas da temperatura média do ar e da deficiência hídrica da cultura.

Já ZULLO *et al.* (2018), trabalhou com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da cana-de-açúcar para a região Centro-Sul, sobre a influência do cenário climatológico e do cenário mais extremo de mudanças climáticas do IPCC/CMIP5, utilizando diferentes modelos do IPCC, com as variáveis meteorológicas em frequência mensal. Com essas informações, os autores produziram um zoneamento com o cenário síntese dos resultados de todos os modelos utilizados no estudo (Figura 11).

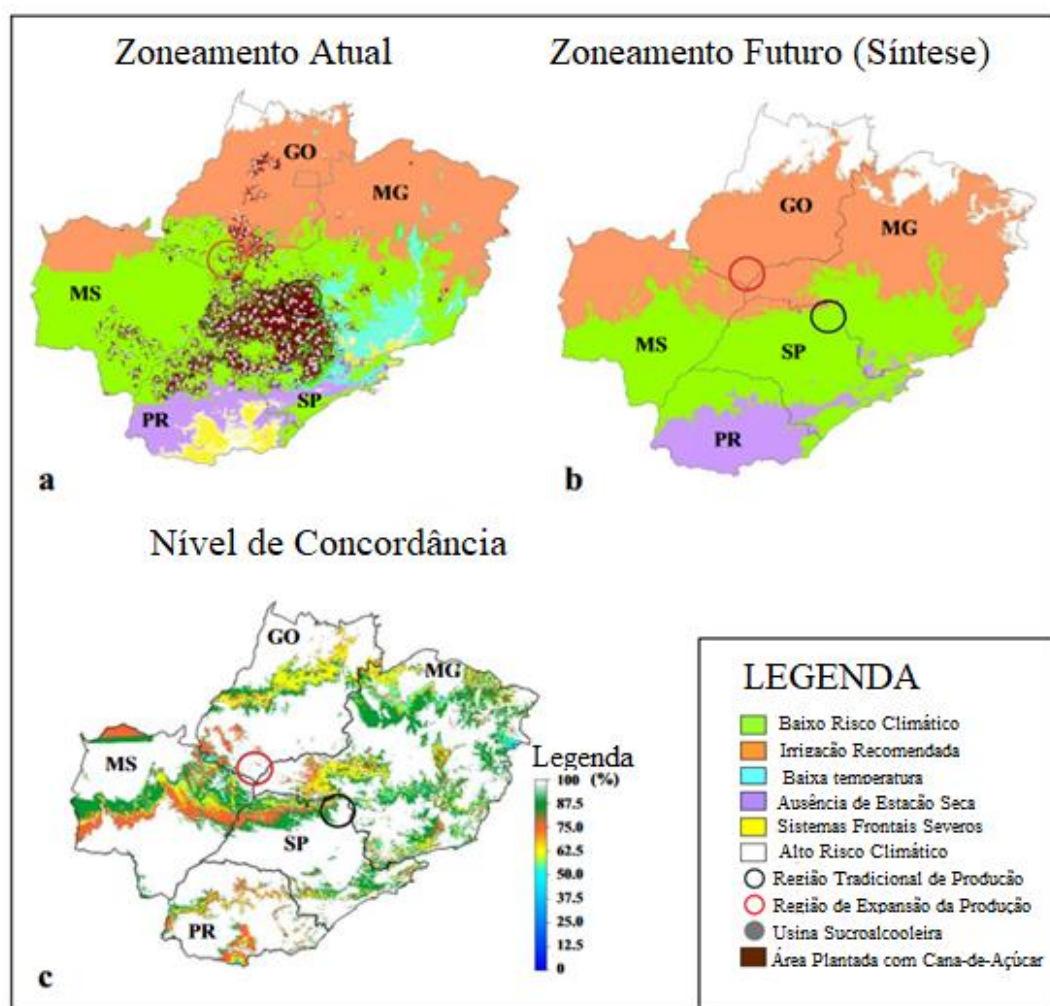


Figura 11: Zoneamento Agrícola de Risco Climático do clima corrente (a), do cenário síntese de todos os modelos do IPCC/CMIP5 utilizados no trabalho (b) e um mapa do nível de concordância entre os modelos. Para o caso dos zoneamentos (a) e (b), as classes de risco de cada zona estão representadas pelo baixo risco (em verde claro), recomendação de irrigação(em laranja), temperaturas baixas (em azul claro), ausência de estação seca (em roxo), sistemas frontais severos (em amarelo) e alto risco climático (em branco). Fonte: Tradução própria de ZULLO *et al.* (2018).

No trabalho desenvolvido por TAYT-SOHN *et al.* (2018), foram gerados mapas de aptidão agroclimática (déficit hídrico e temperatura média do ar) da cana-de-açúcar sobre a região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, em relação ao cenário climatológico e aos cenários de mudanças climáticas (RCP 8.5 e RCP 4.5) de dois modelos globais do IPCC/CMIP5 (ESM2M e ESM2G). Nesses mapas foram avaliadas três faixas de riscos ao cultivo da cana-de-açúcar em relação ao déficit hídrico e à temperatura média anual. Além disso, esses mapas, em conjunto com o mapa de uso da terra foram, posteriormente, avaliados com a finalidade de se observar e indicar as melhores áreas para o cultivo da cana-de-açúcar se expandir de forma a gerar o menor impacto possível ao meio ambiente.(Figura 12-Figura 13).

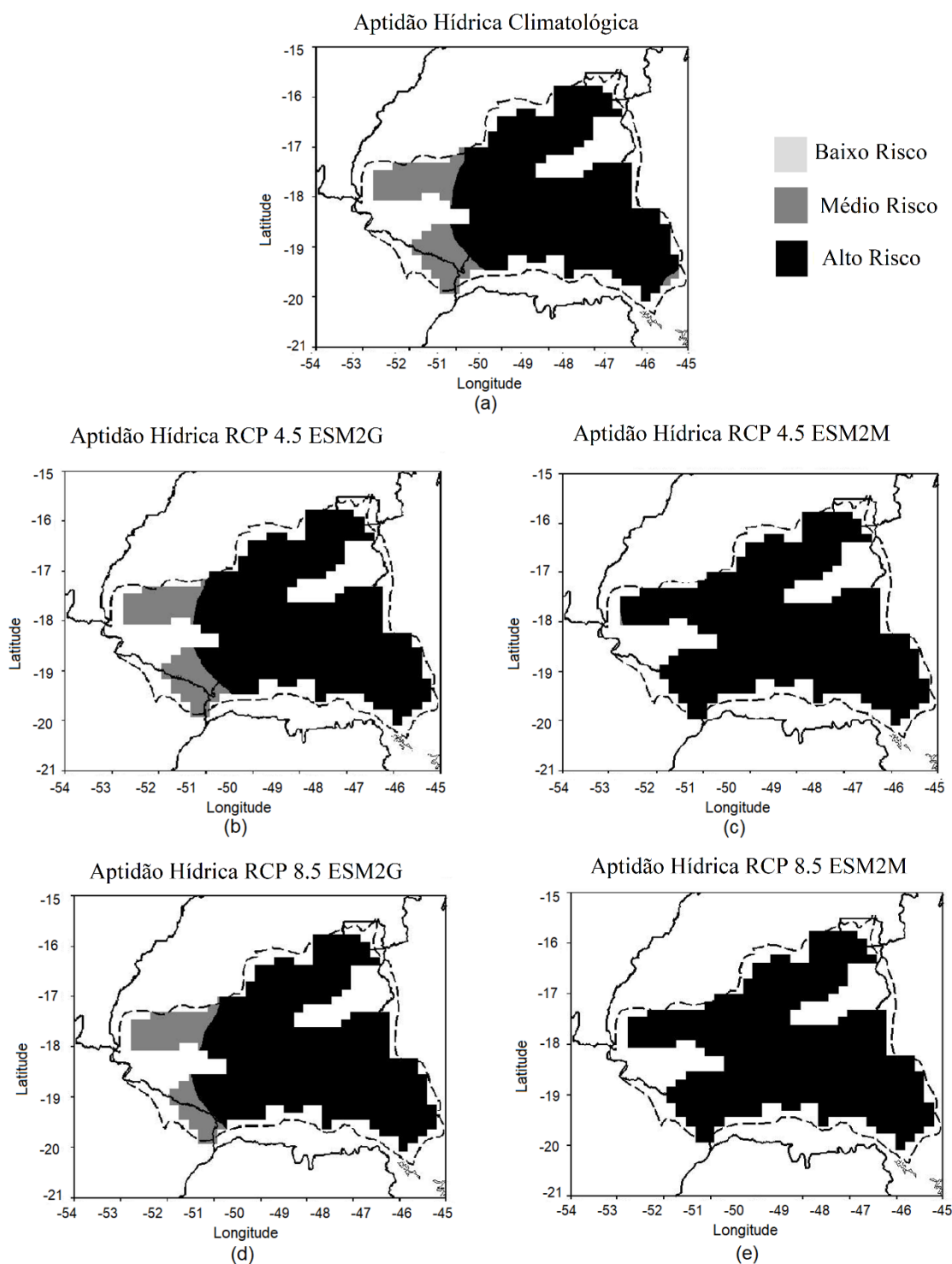


Figura 12: Aptidão hídrica da bacia hidrográfica do rio Paranaíba para o cenário climatológico observado (a), para o cenário RCP 4.5 do modelo ESM2G (b), para o cenário RCP 4.5 do modelo ESM2M (c), para o cenário RCP 8.5 do modelo ESM2G (d) e para o cenário RCP 8.5 do modelo ESM2M (e), com três classes de risco: baixo risco (em cinza claro), médio risco (em cinza escuro) e alto risco (em preto). Fonte: tradução própria de TAYT-SOHN *et al.* (2018).

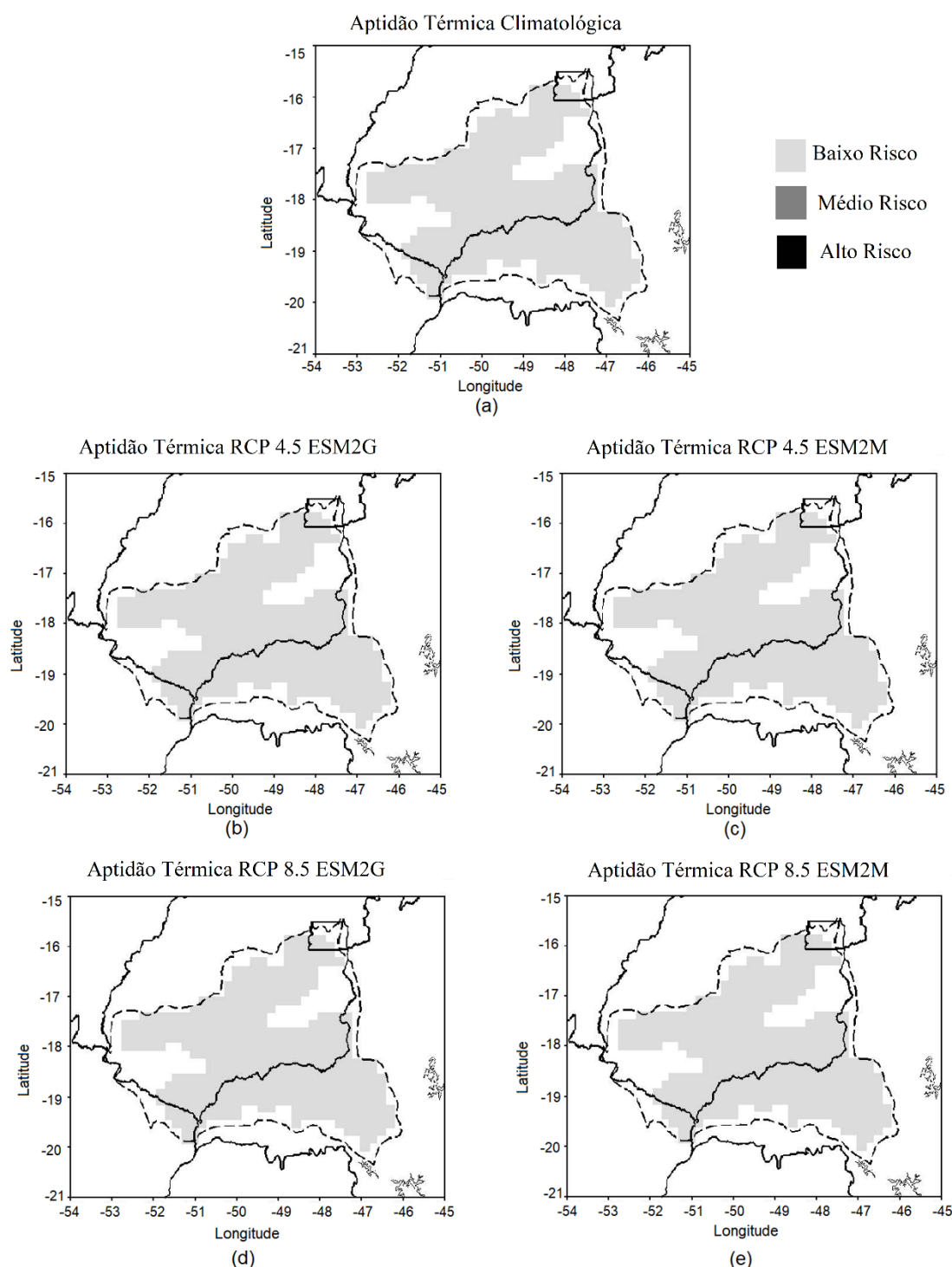


Figura 13: Aptidão Térmica da bacia hidrográfica do rio Paranaíba para o cenário climatológico observado (a), para o cenário RCP 4.5 do modelo ESM2G (b), para o cenário RCP 4.5 do modelo ESM2M (c), para o cenário RCP 8.5 do modelo ESM2G (d) e para o cenário RCP 8.5 do modelo ESM2M (e), com três classes de risco: baixo risco (em cinza claro), médio risco (em cinza escuro) e alto risco (em preto). Fonte: tradução própria de TAYT-SOHN *et al.* (2018).

No trabalho de TAYT-SOHN *et al.* (2018) foi concluído que, para a região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, o real fator limitante do cultivo da cana-de-açúcar seria a necessidade hídrica da cultura, e que a região sudoeste da bacia seria a melhor região para ocorrer a expansão dessa cultura, uma vez que apresenta potencial

agrometeorológico e é uma região ocupada por pastagens que poderiam ser realocadas para áreas de pastagem degradada.

Em ALMEIDA *et al.* (2013) e em ZULLO *et al.* (2018), foram utilizadas diferentes técnicas metodológicas para a obtenção dos parâmetros necessários para a formulação da aptidão climática utilizada no zoneamento da cana-de-açúcar. Assim como em MANZATTO *et al.* (2008), que utilizou um modelo para simular as necessidades hídricas do cultivo, ou em TAYT-SOHN *et al.* (2018), que utilizou um software (CROPWAT 8.0) para obter informações que eram demandadas para a formulação dos mapas de aptidão climática da região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

4.4 Aplicação do Zoneamento na Tese

Como mencionado anteriormente no item 3.3, existem várias abordagens que podem prover informações para a formulação de um zoneamento voltado para a agricultura.

Os modelos de sistema agrícola, por exemplo, são capazes de fazer simulações sobre áreas de expansão dos mais diversos cultivos frente aos cenários: climatológico e de mudanças climáticas, fornecendo produtos sobre o potencial produtivo e a aptidão dos cultivos em diferentes condições climáticas. Por conta disso, o resultado da modelagem é passível de assessorar na disposição de parâmetros para a formulação dos mais variados tipos de zoneamento voltados para a área agrícola. No trabalho feito por DA CUNHA *et al.* (2001), por exemplo, o modelo DSSAT-CSM foi utilizado como ferramenta auxiliadora do zoneamento agrícola para o trigo.

Com base nos parâmetros fornecidos pelos modelos de sistemas agrícolas e na análise do zoneamento da aptidão agroclimática para as áreas de expansão sobre a influência do cenário atual e de projeção climática, é possível traçar estratégias que se traduzam em produtos para a comunidade científica e para os tomadores de decisão, inclusive em relação ao modo que deve ocorrer a expansão da cana-de-açúcar, priorizando a expansão que cause o menor impacto possível ao meio ambiente.

Considerando que o ZAPAC tem seu enfoque sobre questões macroclimáticas e mesoclimáticas além de exigir uma menor quantidade de dados e maior agilidade no quesito computacional, como afirmado por PEREIRA *et al.* (2002), esse tipo de zoneamento foi o escolhido para esta tese.

O ZAPAC atende, assim, diretamente as demandas da tese, a qual direciona o seu estudo para a formulação do zoneamento sob a atuação de diferentes cenários climáticos: do presente e do futuro. Além disso, como se pretende comparar os resultados obtidos em TAYT-SOHN *et al.* (2018) com os resultados da tese, o tipo de zoneamento não poderia diferir substancialmente. Com isso, o modelo DSSAT-CSM trabalhou em conjunto com o tipo de zoneamento escolhido para a tese, subsidiando os parâmetros requeridos pela formulação do ZAPAC.

De forma resumida, os principais objetivos do zoneamento são:

- Indicação de áreas com maior potencial agrícola em termos agroclimáticos para o cultivo da cana-de-açúcar;
- Indicação das áreas que possuem a melhor relação entre consumo hídrico/produtividade (atendendo, assim, a análise de segurança hídrica);
- Indicação das zonas que possuem potencial para o cultivo da cana-de-açúcar e que, atualmente, são ocupadas preferencialmente por pastagens degradadas (atendendo a análise de segurança alimentar);
- Averiguação da expansão ocorrer apenas sobre Unidades de Conservação Ambiental (atendendo as preocupações com o meio ambiente);

CAPÍTULO V

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Como mencionado no item 1 do Capítulo I algumas pesquisas fizeram a análise do balanço hídrico dentro dos modelos de sistema agrícola sobre diferentes óticas. No trabalho feito por SAU *et al.* (2004) é mostrada a importância que um coeficiente de extinção utilizado dentro do modelo DSSAT possui, em que é sugerido, inclusive, que o valor desse coeficiente seja diminuído, ou ainda no trabalho de DEJONGE *et al.* (2012) em que uma modificação sobre coeficiente de cultivo fez com que os resultados da modelagem de sistema agrícola, em relação à evapotranspiração sazonal acumulada, apresentassem um erro menor.

Segundo HELLIOT *et al.* (2015), nos últimos anos algumas proposituras estão sendo feitas em termos do desenvolvimento da modelagem de sistemas agrícolas, dentre elas estão: a elaboração de análises das simulações dos modelos de sistemas agrícolas sobre o potencial produtivo em condições de mudanças climáticas, para diferentes zonas agroclimáticas, e a avaliação do impacto nas respostas dos modelos de sistemas agrícolas em razão da aplicação de diferentes metodologias de evapotranspiração.

Nos trabalhos de SAU *et al.* (2004); DEJONGE *et al.* (2012), por exemplo, foram avaliadas algumas metodologias de cálculo da evapotranspiração. Neste trabalho de tese foram avaliadas diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração, através da revisão bibliográfica, sendo selecionada a equação que apresentava as melhores correspondências com a região estudada.

Após essa seleção prévia, as equações escolhidas foram avaliadas, com a seleção daquela equação que produzisse o resultado mais próximo com a realidade, e fosse uma equação capaz de gerar resultados de menores incertezas para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Para assim, ela ser adicionada ao código de um modelo de sistema agrícola. Tendo como finalidade a formulação de um zoneamento da cana-de-açúcar de menor incerteza.

Em razão do exposto, a metodologia da tese se dividiu em duas fases: Fase 1 e Fase 2.

Na Fase 1 foi feita a revisão bibliográfica sobre o tema dos diferentes cálculos de estimativa da evapotranspiração e, com base nisso foi feita a seleção dos métodos com a melhor performance para o clima da Bacia hidrográfica do rio Paranaíba. A revisão bibliográfica assistiu também à modificação da equação selecionada, para apresentar um melhor desempenho em diferentes cenários meteorológicos, havendo a validação do método modificado frente aos dados observados e a análise de sensibilidade da equação em relação à equação de PENAMN-MONTEITH.

Na Fase 2, foi inserida a equação selecionada na Fase 1 dentro do código do modelo DSSAT/CANEGRO. Posteriormente, foram feitas as simulações de análise de sensibilidade do modelo DSSAT/CANEGRO em relação à equação modificada desenvolvida na tese e a equação de PENAMN-MONTEITH frente aos dados observados de evapotranspiração e produtividade. Em sequência, foram feitas as simulações da necessidade hídrica e da produtividade pelo modelo DSSAT/CANEGRO, sendo este forçado pelos cenários climatológico, de base e o de projeções climáticas.

Fazendo mão desses resultados, foi formulado o zoneamento de aptidão climática da cana-de-açúcar para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba e, por fim foi feita a avaliação deste zoneamento quanto a possibilidade de a expansão da cana-de-açúcar acometer Unidades de Conservação ambiental, através da utilização do mapa de uso dos solos da bacia supracitada.

A metodologia e a sua ordem cronológica podem ser observadas de forma esquemática por meio do fluxograma da Figura (3).

5.1 Área de Estudo

A Bacia hidrográfica do rio Paranaíba ocupa 2,6% do território Nacional, é a segunda maior bacia que compõe a região hidrográfica do Paraná, com 25.4% da área total desta região. Fazem parte desta bacia os estados de Goiás (abrangendo 63,27% da área total), Minas Gerais (abrangendo 31.67%), Distrito Federal (abrangendo 1,65%) e Mato Grosso do Sul (abrangendo 3,41%), (ANA, 2013; CBH-PARANAIBA, 2015; ANA, 2017).

Esta bacia possui relevância para o setor elétrico, com 20 usinas hidrelétricas significativas implantadas na região, como São Simão, Corumbá I, Cachoeira Dourada, Emborcação, Nova Ponte e Itumbiara e apresentando uma potência total (juntando pequenas centrais hidrelétricas e as usinas hidrelétricas) de aproximadamente 9 mil MW (ANA, 2013).

É possível também observar nessa região mais 20 usinas termelétricas, responsáveis por uma potência total de cerca de 300 MW, e mais usinas sucroalcooleiras que queimam o bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica, com uma potência total de aproximadamente 1300 MW (ANA, 2013)

Segundo a UDOP (2015), a bacia dispõe de 49 usinas de etanol, onde a maioria está localizada na região oeste da bacia. A ANA (2013) menciona que esta região possui seu foco voltado para o agronegócio, incluindo a produção de bioenergia, a extração de recursos naturais e a pecuária, contando com cerca de 78 milhões de hectares de pastagem.

Vale ressaltar, que os dois estados de maior contribuição territorial dentro da bacia, Goiás e Minas Gerais, dispõe de grandes extensões de terra com pastagem em algum nível de degradação, as quais apresentam também baixa produtividade (32%-34%), que são cerca de 5 milhões de hectares em Goiás e 4,6 milhões de hectares em Minas Gerais. Sendo assim, possível encontrar áreas deste tipo de pastagem dentro da bacia, principalmente em sua região norte (STRASSBURG *et al.*, 2014; GALDINO *et al.*, 2016; FERNANDES *et al.*, 2018).

A região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba foi escolhida devido ao fato de ser um dos *hotspots* da expansão da cana-de-açúcar no Brasil, como mencionado na introdução (Figuras 2 e 3), e apontado por SILVA & MIZIARA (2011); RIBEIRO *et al.* (2016); NIPE-UNICAMP, IBGE & CTC *apud* UNICA (2016); IBGE (2018);. Além de possuir uma boa quantidade de dados passíveis de serem coletados, incluindo o Plano de Recursos Hídricos da bacia (ANA, 2013).

A região selecionada para este estudo está delimitada entre 15-20°S e 45-53°O, possuindo uma área de aproximadamente 49 milhões de hectares. Já a bacia possui uma área de cerca de 22,26 milhões de hectares (ANA, 2013; CBH, 2015).

O clima predominante da bacia é o clima tropical de savana “AW”, de acordo com a classificação de KÖPPEN & GEIGER (1936). Apesar de existirem atualizações do mapa com as classificações climáticas feitas por KÖPPEN & GEIGER (1936), na região da bacia hidrográfica do rio a classificação climática permanece a mesma. BERNARDES (1951) e, mais recentemente, ALVARES *et al.* (2013) corroboram que a classificação climática feita por KÖPPEN & GEIGER (1936) continua válida para a bacia.

Segundo a ANA (2013), o regime pluviométrico climatológico da região possui os maiores acumulados de precipitação entre novembro e março e os menores acumulados entre maio e setembro.

O Cerrado é o bioma que prevalece na bacia e é considerado com um dos *hotspots* em biodiversidade no planeta, com a savana mais rica do mundo. A vegetação da região pode ser dividida entre: gramíneas, florestas, e pequenos arbustos. Atualmente este bioma tem apenas 22,4% de área remanescente na bacia, como mostrado na Figura (14), (RATTER *et al.*, 1997; MYERS *et al.*, 2000; RIBERO & WALTER, 1998; ANA, 2013)

A Mata Atlântica é o segundo bioma que pode ser encontrado na região. Esse tipo de bioma é contemplado com 850 espécies de aves, 370 de anfíbios, 200 de répteis, 270 de mamíferos e 350 de peixes. Atualmente, o bioma da Mata Atlântica tem apenas 14,4% da sua cobertura original na bacia (Figura 14) (ANA, 2013; MMAc, 2018).

Apesar desse intenso desmatamento que ocorreu no passado, a bacia, hoje, conta com 44 Unidades de Conservação Ambiental (UCs), com 43 Reservas Particulares do Patrimônio Nacional (RPPNs) e inúmeras Reservas Particulares para a Conservação da Biodiversidade (APCBs) (ANA, 2013), como mostrado na Figura (14).

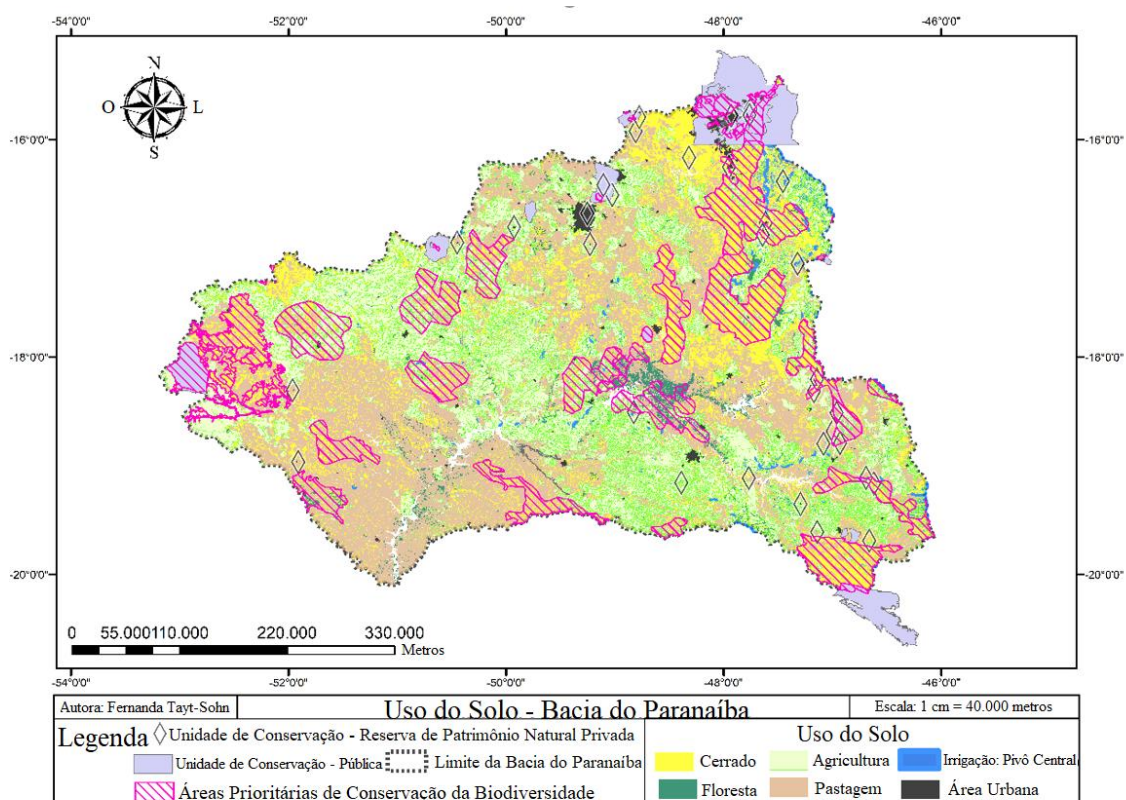


Figura 14: Mapa do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, sendo o Cerrado (em amarelo), Mata Atlântica (em verde escuro), agricultura (em verde claro), pastagem (em bege), áreas de irrigação com pivô central (em azul marinho), áreas urbanas (em preto), UCs (em lilás), RPPNs (tracejado rosa) e APCBs (ícone em formato de losango) e limite da bacia hidrográfica do rio Paranaíba (tracejado cinza). Fonte: TAYT-SOHN *et al.* (2018) com base em ANA (2015).

5.2 A Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene, com metabolismo do tipo C4 (MOORE, 1987). Segundo EHLERINGER & BJÖRKMAN (1994), as plantas C4 são mais eficientes no uso da água, em situações de aumento da temperatura média do ar e em situações do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, quando comparadas a plantas de metabolismo C3 (como a soja, o milho e a maioria das espécies arbóreas).

Botanicamente, como estabelecido por CRONQUIST (1988), a classificação da cana-de-açúcar é a seguinte: A cana-de-açúcar pertence ao reino *Plantae*; ao Filo *Magnoliophyta*, à classe *Liliopsida*, à ordem *Cyperale*, à família *Poaceae*, à sub-família *Panicoideae*, à tribo *Andropogoneae*, à subtribo *Saccharinae* e ao gênero *Saccharum*. Além disso, dentro do Gênero *Saccharum* existem seis espécies: *S.officinarum*, *S.spontaneum*, *S.robustum*, *S.sinense*, *S.Barberi* e *S.edule*.

Dessas seis espécies, duas são selvagens: *S.spontaneum*, *S.robustum*, e quatro são domesticadas: *S.officinarum*, *S.sinense*, *S.barberi* e *S.edule*. Vale ressaltar que os cultivares modernos são híbridos do cruzamento entre as espécies (GRIVET *et al.*, 2004). Porém segundo D'HONT *et al.* (1996); D'HONT & GLASZMANN (2001), duas espécies contribuíram de forma destacada na origem dos cultivares atuais a *S.officinarum* e a *S.spontaneum*.

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é realizado em um ciclo de 6 anos, com o primeiro ciclo de cana-planta, tendo duração de 12 a 18 meses, quatro ciclos sucessivos de cana soca, e um ciclo de reforma do canavial (COCK, 2003; SEGATO *et al.*, 2006; MACEDO *et al.*, 2008).

A cana soca surge a partir da rebrota da base da cana planta após seu corte, ou após o corte da cana soca. Ela normalmente possui um ciclo de 12 meses e é similar à cana planta em termos de crescimento, divergindo principalmente quanto à produtividade, enraizamento e no processo de rebrota (DOOREMBOS & PRUIT, 1977; DOOREMBOS & KASSAN, 1979; SHIH & GASHO, 1980; ALLEN *et al.*, 1998; VERMA, 2002).

Os estágios fenológicos da cana-de-açúcar podem ser divididos em quatro: (1) Germinação/Emergência, (2) Perfilhamento/Estabelecimento, (3) Desenvolvimento e (4) Maturação (DOOREMBOS & KASSAN, 1979; SHIH & GASHO, 1980; SEGATO *et al.*, 2006; MARIN *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2012).

Cada fase tem um período de duração que é dependente do clima, da cultivar e do manejo (VAN DILLEWIJN, 1952).

De acordo com BARNES *et al.* (1964), em tempos remotos, a cana-de-açúcar era utilizada para mascar e como bebida. SPENCER & MEADE (1889) *apud* BARNES *et al.* (1964) relatam que a primeira vez que o açúcar foi produzido na forma sólida foi em 500 D.C.

Atualmente, o açúcar advindo da cana-de-açúcar é um dos *commodities* mais vendidos do mundo. O Brasil e a Índia despontam na produção de cana-de-açúcar mundial, com o Brasil ocupando a posição de liderança (FAO, 2018).

Hoje, essa matéria prima também é utilizada no Brasil para a produção de etanol, e ocupa lugar de destaque na produção deste biocombustível, pois junto com os Estados Unidos esses dois países são responsáveis por 85% da produção de etanol mundial (AUDE, 1993; EIA, 2017; RFA, 2017).

Como visto, a cana-de-açúcar desempenha um papel importante para o País em termos econômicos, alimentícios e energéticos. Ela possui características biofísicas e de produção que fazem dessa planta uma verdadeira “*usina biológica de energia*”, termo utilizado por CABRAL (2014).

Dentre os atributos dessa “*usina biológica de energia*” estão: o fato de ser altamente produtiva, com uma utilização eficiente dos insumos agrícolas (águas, fertilizantes, pesticidas, trabalho); possui uma alta eficiência nos processos fotossintéticos, como mencionado por ALEXANDER (1973) e por BYRT *et al.* (2011); tem facilidade de processamento com uma versatilidade na formulação de produtos com maior valor agregado (açúcar, etanol e energia elétrica); e os produtos gerados desta matéria-prima são capazes de serem armazenados e dispõe de facilidade no transporte (MOORE *et al.* 2014).

5.3 Levantamento da Base de Dados

O levantamento de dados utilizados na tese também se divide em dois grupos (FASE 1 e FASE 2). O primeiro grupo está relacionado à validação do cálculo desenvolvido para a estimativa da evapotranspiração, em que foi necessária a coleta dos dados das medidas da evapotranspiração observada e dos dados meteorológicos.

Já o segundo grupo, está relacionado aos dados que são necessários para a simulação do modelo de sistema agrícola (DSSAT/CANEGRO) e para a formulação e avaliação do zoneamento (ZAPAC). Neste caso, os dados necessários foram os dados:

meteorológicos, do tipo do solo; biológicos sobre a cana-de-açúcar, sobre a produção real da cana-de-açúcar e sobre o manejo da cana-de-açúcar; além do mapa atual do uso do solo da Bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

5.3.1 Levantamento dos Dados Lisimétricos de Evapotranspiração (FASE 1)

Segundo LOOS *et al.* (2007), o lisímetro de pesagem é considerado como a maneira mais precisa de se medir a evapotranspiração e alguns outros componentes do balanço hidrológico. HOWELL *et al.* (1985) cita que para medidas de campo da evapotranspiração sob condições de vento, o lisímetro se mostrou estável.

Muitos trabalhos utilizam este instrumento de mensuração para calibrar parâmetros, avaliar e validar equações de evapotranspiração, como nos trabalhos de MAKINK (1957); PRIESTLEY & TAYLOR (1972); JENSEN *et al.* (1990); PEREIRA (2004); VILA NOVA & PEREIRA (2006), dentre outros.

Com isso, os dados levantados de evapotranspiração utilizados na tese, foram selecionados levando em conta o lisímetro como instrumento de mensuração. Os dois experimentos utilizaram um lisímetro de pesagem 1 m² de base e 0,7 m de altura, tendo sido instalado em área de aproximadamente 250 m², cultivada com grama-batatais (*Paspalum notatum*). Um maior detalhamento deste instrumento pode ser encontrado em CRUZ (2005) e em CARVALHO *et al.* (2007).

Apesar de esse instrumento ser capaz de fornecer a medida direta da evapotranspiração, ele é custoso, requer mão de obra especializada e, se não for bem implementado, pode apresentar erros consideráveis na medida da evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998; ALLEN *et al.*, 2001). Assim, poucos experimentos que utilizam esta metodologia de mensuração são encontrados no País, e por conta disto não foram encontrados experimentos de lisímetro dentro da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

JENSEN *et al.* (1990) avaliou 20 metodologias de cálculo para evapotranspiração em 11 zonas climáticas diferentes utilizando medidas lisimétricas. VALIPOUR *et al.* (2017) também avaliou a performance de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração para diferentes tipos de clima utilizando o lisímetro como instrumento de medida padrão.

Com base nesses trabalhos, assumiu-se para a validação da estimativa de evapotranspiração a utilização de dados lisimétricos e meteorológicos de uma localidade que apresentasse: a mesma classificação climática da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, tropical de savana (Aw), e que estivesse numa faixa latitudinal também

contida na bacia, sendo escolhida a região de Seropédica (RJ). Assim, foi feita a validação da equação de evapotranspiração em Seropédica (RJ), com a finalidade de aplicá-la dentro do modelo de sistema agrícola para analisar a região da bacia. Assim como o tipo de clima, a região da bacia e a região de Seropédica possuem regimes pluviométricos semelhantes, como pode ser observado na Figura (15).

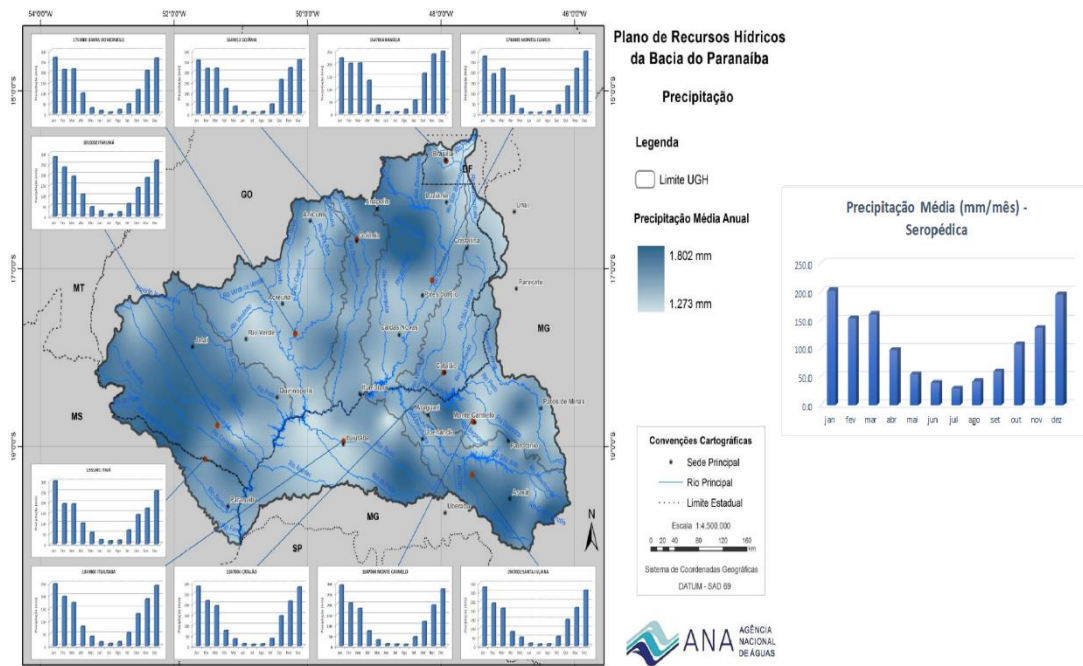


Figura 15: Histogramas da precipitação média mensal (mm/mês) para o período anual de diversas estações meteorológicas localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, e histograma da estação meteorológica localizada em Seropédica (em destaque à direita). Fonte ANA (2013); INMET (2018).

As medidas lisimétricas da evapotranspiração (mm dia^{-1}) do primeiro experimento foram utilizadas também no artigo de SOUZA *et al.* (2011) e foram concedidas cordialmente para esta pesquisa pelo professor Daniel Fonseca de Carvalho, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Já os dados lisimétricos de evapotranspiração (mm dia^{-1}) do segundo experimento foram obtidos no artigo de CARVALHO *et al.* (2007).

Os dois experimentos apresentam seus dados na frequência diária e os períodos coletados vão de: 30 de junho de 2006 a 30 de junho de 2007, e de 24 de dezembro de 2004 a 1 de fevereiro de 2005, para o primeiro e segundo experimento respectivamente.

Entre junho de 2004 e março de 2005, entre agosto de 2006 e fevereiro de 2007 e em junho de 2007 ocorreram dois episódios de El Niño fraco e um episódio de La Niña, que em princípio ainda era fraco, respectivamente. Tais fenômenos impactam as variáveis meteorológicas, como temperatura e precipitação, da região de Seropédica

(RJ), principalmente quando a sua intensidade é classificada como moderada, como analisado por OLIVEIRA JUNIOR *et al.* (2014).

Segundo o INMET (2018b), de forma geral, não ocorreram valores expressivos de anomalias de precipitação anual para os anos de 2004, 2006 e 2007, possuindo valores entre a média ou pouco abaixo da média climatológica de precipitação. Com exceção do ano de 2005 que apresentou um acumulado de precipitação anual acima da média climatológica.

5.3.2 Levantamento dos Dados Meteorológicos (FASE 1)

Na Fase 1 também foram coletados dados meteorológicos observados próximo aos dois experimentos de medida de evapotranspiração utilizados na tese.

A demanda por variáveis meteorológicas feita pelo cálculo da estimativa de evapotranspiração foi um dos fatores determinantes na seleção dessas variáveis. Assim, foram coletadas para o primeiro experimento as variáveis de temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$), de umidade relativa média do ar (%), de velocidade do vento a 2 metros (m s^{-1}) e de radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). Estes dados advêm das estações de superfície convencional e automática, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas na latitude $22^{\circ}45'13''\text{S}$ e longitude $43^{\circ}40'23''\text{O}$, em Seropédica, município do estado do Rio de Janeiro (RJ). Vale ressaltar que os dados também foram cordialmente fornecidos pelo professor Daniel Fonseca de Carvalho, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Além desses dados, foram também utilizados nesse primeiro experimento, os dados de pressão atmosférica [KPa] da estação do Rio de Janeiro pertencente ao INMET, localizada na latitude a $22^{\circ}89'\text{S}$ e na longitude $43^{\circ}18'\text{O}$. A frequência de todas as variáveis meteorológicas é diária, para o período de 30 de junho de 2006 a 30 de junho de 2007.

O levantamento dos dados meteorológicos observados do segundo experimento, foi feito utilizando os dados contidos no artigo de CARVALHO *et al.* (2007). Por meio dele foram coletadas as variáveis de temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa média (%), velocidade do vento a 2 metros (m s^{-1}), radiação global ($\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$) e acumulado de precipitação (mm dia^{-1}).

De acordo com CARVALHO *et al.* (2007), esses dados foram obtidos de uma estação meteorológica automática pertencente a EMBRAPA – Agrobiologia, localizada

na latitude 22°48'S e na longitude 43°41'O, e são dados de frequência diária e compreendem o período de 24 de dezembro de 2004 e 1 de fevereiro de 2005.

5.3.2.1 Tratamento dos Dados Meteorológicos

A equação desenvolvida nesta tese demanda dados do balanço de radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), o qual não estava disponível para coleta. Com isso, utilizando os dados disponíveis e seguindo as equações e procedimento recomendados por ALLEN *et al.* (1998), fez-se a estimativa do balanço de radiação solar considerando: a equação da radiação solar extraterrestre para períodos diários (Equação 32), a equação da radiação solar de céu claro (Equação 37), as equações dos balanços de radiação solar de onda curta e longa (Equações 38-39), equações que prestaram assistência às equações mencionadas anteriormente (Equações 33-36) e, finalmente, a equação que faz a estimativa do balanço de radiação solar (Equação 40):

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} * G_{SC} * d_r * [\omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s)] \quad \text{Equação (32)}$$

Em que: R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G_{SC} é a constante solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); d_r é o inverso da distância relativa entre a Terra e o Sol; ω_s é o ângulo da hora do pôr do sol (rad); φ é a latitude (rad); δ é a declinação do sol (rad).

Para a conversão de graus decimais para radianos, utilizou-se da Equação (33).

$$\text{Radiano} = \frac{\pi}{180} * (\text{Graus decimais}) \quad \text{Equação (33)}$$

Para o cálculo do inverso da distância relativa entre a Terra e o Sol, da declinação solar e do ângulo da hora do pôr do sol, utilizou-se a (Equação 34), a (Equação 35) e a (Equação 36):

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} * J\right) \quad \text{Equação (34)}$$

$$\varphi = 0.409 * \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} * J - 1.39\right) \quad \text{Equação (35)}$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad \text{Equação (36)}$$

Em que: J é o número relativo ao dia do ano do calendário juliano, em que 1 de janeiro é dia 1 e 31 de dezembro é o dia 365 ou 366; d_r é o inverso da distância relativa entre a

Terra e o Sol; ω_s é o Ângulo da hora do pôr do sol (rad); φ é a latitude (rad); δ é a declinação do sol (rad).

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * Z) * R_a \quad \text{Equação (37)}$$

Em que: R_{so} é a radiação solar de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Z é a elevação da estação meteorológica em relação ao nível do mar (m), R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad \text{Equação (38)}$$

Em que: R_{ns} é o balanço da radiação solar de onda curta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); α é o albedo (sem dimensão); R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

$$R_{nl} = \sigma * \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] * (0.34 - 0.14 * e_a^{0.5}) * (1.35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad \text{Equação (39)}$$

Em que: R_{nl} é o balanço de radiação de onda longa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ é a constante Stefan-Boltzmann ($4.903 * 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $T_{\max,k}^4$ é a temperatura máxima absoluta em um período de 24 horas (K); $T_{\min,k}^4$ é a temperatura mínima absoluta em um período de 24 horas (K); e_a é a pressão atual do vapor (KPa); $\frac{R_s}{R_{so}}$ é a radiação de onda curta relativa (limitada a ser ≤ 1); R_s é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} é a radiação solar de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Equação (40)}$$

Em que: R_n é o balanço de radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{ns} é o balanço da radiação solar de onda curta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} é o balanço de radiação de onda longa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

5.3.3 Levantamento dos Produtos Meteorológicos (FASE 2)

5.3.3.1 Produtos de Reanálise para o Cenário Climatológico

Para a Fase 2, as variáveis meteorológicas selecionadas foram aquelas que serviriam como parâmetros de entrada para o modelo DSSAT/CANEGRO, sendo elas: a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura mínima

($^{\circ}\text{C}$) e o acumulado de precipitação (mm dia^{-1}), tendo sido coletadas tanto de produtos de reanálise, quanto de produtos de modelos climatológicos regionais.

Esse tipo de produto é uma alternativa quando há a falta de dados meteorológicos observados na região que se deseja estudar, muitas vezes por se tratar de locais remotos, ou de difícil acesso, ou por se tratar de épocas em que ainda não existiam estações meteorológicas implementadas na região, dentre outras razões.

A reanálise pode ser definida como uma análise dos cenários passados, na qual são utilizados a assimilação de dados invariável no tempo e a modelagem numérica que usufrui de todos os dados observados disponíveis e passíveis para a simulação a cada 6 ou 12 horas, computando o período analisado (KALNAY *et al.* 1996; TAPIADOR *et al.*, 2011).

Existem diversas reanálises que podem ser utilizadas, entre as principais estão: a ERA-INTERIM²⁰ que possui dados de 1979 até o presente (DEE *et al.*, 2011); a ERA-40²¹ que tem dados no período entre 1957 a 2002 (UPPALA *et al.*, 2005), ambas pertencentes ao (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-ECMWF*); NCEP²²//NCAR²³ *Reanalysis 1* com dados de 1948 até o presente (KALNAY *et al.*, 1996); NCEP-DOE²⁴ *Reanalysis 2*, que tem seus dados para o período de 1979 até o presente (KANAMITSU *et al.*, 2002); NCEP/CFSR²⁵, que também trabalha com o período que vai desde 1979 até o presente (SASHA *et al.*, 2010); a JRA-55²⁶, que vai desde 1957 até a atualidade (EBITA *et al.*, 2011); e a MERRA²⁷, que também trabalha com o período entre 1979 até a atualidade (RIENECKER *et al.*, 2001), como por LINDSAY *et al.* (2014).

A escolha da reanálise utilizada neste estudo se baseou, principalmente, no período em que ocorreria a sobreposição entre as variáveis dos cenários históricos, advindas da modelagem regional climática, e as variáveis dos produtos de reanálise. O período de integralização da simulação histórica regional climática inicia em janeiro de 1971 e, por conta disto, o início dos produtos coletados da reanálise também iniciam

²⁰ ERA- *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis*.

²¹ ERA-40- *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40 years Re-Analysis*

²² NCEP _ *National Center for Environmental Prediction*.

²³ NCAR – *National Center for Atmospheric Research*.

²⁴ DOE- *Department of Energy*.

²⁵ CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis*.

²⁶ JRA-55- *Japanese 55 years Reanalysis*.

²⁷ MERRA - *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application*.

nesta data, indo até dezembro de 2000, fechando assim um período para uma climatologia de 30 anos, como recomendado pela OMM (2011).

Adicionalmente, um segundo período de coleta de dados também influenciou na escolha da reanálise. Esse segundo período vai de janeiro de 2007 a dezembro de 2017, dando suporte às necessidades da análise de sensibilidade do modelo DSSAT/CANEGRO quanto à previsibilidade da produção da cultura estudada quando modificado o cálculo de evapotranspiração. Vale frisar que todas as variáveis meteorológicas coletadas devem estar em uma frequência diária.

Segundo NCARS (2019), a reanálise 1 do NCEP/NCAR é uma das principais reanálises do meio científico, dispondo de uma grande quantidade de publicações e sendo considerada como uma referência de cenário de base. Ela possui produtos para todos os dois períodos utilizados na tese, e diversos trabalhos voltados para a modelagem na agricultura utilizam esta reanálise, como os trabalhos de: RODRIGUEZ-PUEBLA *et al.* (2007); ROBERTSON *et al.* (2007); COHN *et al.* (2016); ANDERSON *et al.* (2017).

Levando em consideração a explanação anterior, foi escolhida a reanálise 1 do NCEP/NCAR para ser trabalhada na tese. Esta reanálise possui uma resolução de aproximadamente 210 km, com um domínio de atuação global e com 28 níveis verticais do tipo sigma, além de contar com produtos para a frequência diária (KALNAY *et al.*, 1996; KISTLER *et al.*, 2001).

Para a tese foi selecionada a região que está entre as latitudes de 15⁰S a 20⁰S e as longitudes de 45⁰O a 53⁰O, abrangendo a região da bacia estudada. Todos os produtos de reanálise coletados estão disponíveis na plataforma do (*Earth System Research Laboratory-ESRL*) que pertence à (*National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA*) (ESRL, 2017).

5.3.3.1.1. Tratamento dos Produtos da Reanálise I

Os produtos obtidos da reanálise I NCEP/NCAR passaram por uma conversão de unidades e foi feita a média climatológica em frequência diária através do (*Climate Data Operator-CDO*) (CDO, 2017). Os resultados desses procedimentos feitos no CDO foram formatados, por meio de um script em linguagem computacional FORTRAN 90, que foi construído durante a pesquisa com a finalidade de criar um arquivo no formato que o modelo DSSAT/CANEGRO pudesse ler.

5.3.3.2. Dados Observados da Concentração de CO₂ na Atmosfera

Foram utilizados dados observados, na base diária da concentração de CO₂ na atmosfera (ppm), que foram disponibilizados pelo próprio modelo DSSAT-CSM versão 4.5.

5.3.3.2.1. Tratamento dos Dados Observados da Concentração de CO₂ na Atmosfera

Foi feita a média climatológica da concentração de CO₂ na atmosfera entre os anos de 1971 a 2000, com a finalidade de utilizar essa climatologia em conjunto com os dados climatológicos observados e históricos.

5.3.3.3. Produtos Meteorológicos da Modelagem Climática Regional

Como citado por WANG *et al.* (2004), os modelos (dinâmicos) climáticos regionais (MCRs) são capazes de fornecer maior refinamento espacial da região simulada, e maior detalhamento dos processos físicos da atmosfera em escala regional/local, quando comparados aos modelos climáticos globais.

Ainda segundo WANG *et al.* (2004), para fazer uma simulação de maior refinamento, a modelagem (dinâmica) climática regional recebe, normalmente, como condições iniciais e de contorno os resultados de uma modelagem climática global, ou de uma reanálise, e assim é capaz de exercer o processo conhecido como regionalização dinâmica. Desde o final da década de 1980 os MCRs estão em constante processo de aperfeiçoamento, sendo apontadas como pesquisas pioneiras na área dos MCRs os trabalhos feitos por DICKINSON *et al.* (1989) *apud* WANG *et al.* (2004); GIORGI & BATES (1989) *apud* WANG *et al.* (2004).

Atualmente, um experimento criado pelo (*World Climate Research Programme-WCRP*) trabalha com a regionalização dinâmica, a qual recebe como condições iniciais e de contorno os resultados de alguns modelos do CMIP5. Esse experimento é conhecido como (*Coordinated Regional Downscaling Experiment-CORDEX*) e nele foram realizadas, além das práticas computacionais, pesquisas direcionadas para o estudo dos resultados destas regionalizações, observando impactos e analisando as variáveis meteorológicas, dentre outras funções, com grupos de pesquisa na América do Sul, na América do Norte, na África, na Europa, na Ásia etc. (GIORGI *et al.*, 2009).

De acordo com ROCHA *et al.* (2014), o CORDEX para América do Sul, trabalhou com o MCR denominado RegCM4, o qual foi forçado pelos modelos de sistema terrestre, pertencentes ao IPCC/CMIP5: ESM2M (DUNE *et al.*, 2012), HadGEM2-ES²⁸ (MARTIN *et al.*, 2011 *apud* ROCHA *et al.*, 2014) e MPI-ESM-MR (GIORGETTA *et al.*, 2012 *apud* ROCHA *et al.*, 2014).

Esses três últimos modelos globais fazem parte do grupo de modelos conhecido como (*Earth System Models* -ESMs). Tipicamente, um ESM é constituído pelo ciclo do carbono terrestre e oceânico, com *feedbacks* biogeoquímicos, e tem a habilidade de produzir cálculos consistentes sobre os impactos nos ecossistemas ocasionados pelas mudanças climáticas, como mencionado por MARTIN & LEVINE (2012). Porém, segundo COLLINS *et al.* (2011), não há uma definição específica acerca dos processos e o nível de complexidade que um modelo global de projeção climática tem que possuir para ser chamado de ESM

Nas simulações do CORDEX para o Brasil, o RegCM4, além de ser forçado por esses três ESMs, possui uma resolução de aproximadamente 50 km, com 18 níveis verticais sigma e com o esquema de convecção EMANUEL & ZIVKOVIC-ROTHMAN (1999) *apud* ROCHA *et al.* (2014), utilizando o modelo de superfície (*Community Land Model version 3.5* - CLM3.5) (TAWFIK & STEINER, 2011 *apud* ROCHA *et al.*, 2014).

Havia no experimento uma segunda configuração do modelo RegCM4, com diferentes esquemas de convecção e um outro modelo de superfície, porém apenas a configuração detalhada anteriormente tinha os três ESMs forçando o RegCM4. Também vale mencionar que apenas o cenário (*Representative Concentration Pathway 8.5* - RCP 8.5)²⁹ era comum às simulações feitas pelo RegCM4 que foram forçadas pelos três modelos ESMs (ROCHA *et al.*, 2014).

Com isso foram selecionados resultados da regionalização com a configuração detalhada anteriormente, com produtos para o cenário histórico, que vai desde janeiro de 1971 até dezembro 2000 e com produtos projetados para o período de janeiro de 2006 a

²⁸ HadGEM - *Hadley Global Environment Model 2* - *Earth System*.

²⁹ RCP 8.5- O cenário de mudança climática *Representative Concentration Pathway 8.5* pode ser considerado como o cenário mais pessimista dos utilizados pelos modelos climáticos globais do IPCC. Ele apresenta o mais alto nível de emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera; a trajetória ascendente do nível da forçante radiativa, o qual em 2100 estará em torno de 8.5 Wm⁻²; e uma concentração de CO₂equivalente de aproximadamente 1370 ppm e com um nível de poluição do ar de médio a alto (VAN VUUREN *et al.*, 2011; MOSS *et al.*, 2010).

dezembro de 2035 que corresponde ao cenário de mudanças climáticas (RCP 8.5). Todos cenários com variáveis em frequência diária.

A coleta de dados para o caso do cenário RCP 8.5, inicia-se em 2006 devido à própria condição do modelo, em que seus resultados começam em 2006. Considerou-se também as projeções de expansão do etanol de curto prazo apresentadas pelo PDE da EPE (2017), que trabalha com projeções de curto prazo, e o trabalho realizado por TAYT-SOHN *et al.* (2018), que trabalhou com esse período específico. A área selecionada para a coleta dos resultados do modelo RegCM4, segue a seleção prevista para a reanálise e está delimitada entre as latitudes de 15°S a 20°S e as longitudes de 45°O a 53°O.

5.3.3.3.1 Tratamento dos Produtos do CORDEX

As variáveis obtidas dos resultados do CORDEX necessitaram passar primeiramente por um processo de mineração que demandou poder computacional, tempo e teve como consequência uma diminuição do período coletado, em vista de possíveis dados corrompidos.

Apesar dessa diminuição, de forma cautelosa, objetivou-se que estes dados mantivessem um período mínimo de 10 anos, com a possibilidade de se trabalhar com anos não consecutivos.

De acordo com a OMM (2007), em seu relatório intitulado “O papel das normais climatológicas em um clima que está em mudança”, foi observado que, apesar da média climatológica considerar como padrão um período de 30 anos, para os dados de superfície, o erro das médias que possuem 30 anos de dados e que terminam próximo ao ano 2000 foi similar ao observado para médias com 10 a 20 anos de dados. Adicionalmente, o próprio relatório conclui que a habilidade preditiva de médias com dez anos de dados é muito próxima àquela com 30 anos de dados, e menciona que períodos com 10 anos de dados já são considerados adequados na maioria dos casos em que se utiliza médias aritméticas, sendo possível trabalhar com estas médias, denominadas nesses relatório como “normais operacionais”.

Após a mineração e seleção dos produtos, eles precisaram ter suas unidades convertidas e foram calculadas as médias diárias ano a ano e as médias climatológicas anuais em frequência diária. Para tanto, um script feito em *shellscript* foi desenvolvido e utilizado em conjunto com o programa CDO para a realização destas três últimas tarefas. Os resultados desse procedimento também precisaram ser formatados, para isto

outro script em linguagem FORTRAN90 foi gerado para colocá-los de acordo com a formatação exigida aos dados de entrada do modelo de sistema agrícola DSSAT/CANEGRO.

Apesar do CORDEX disponibilizar os produtos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo HadGEM2-ES, optou-se por não utilizar os resultados do modelo por uma questão de calendário, pois neste caso em específico os resultados do RegCM4 estão em um calendário de 360 dias, enquanto que o modelo DSSAT/CANEGRO trabalha com o calendário gregoriano.

5.3.3.4 Parâmetros da Concentração de CO₂ na Atmosfera - Cenário Futuro

Como a projeção coletada do RegCM4 leva em consideração o cenário RCP 8.5, neste trabalho foi utilizada a concentração de CO₂ na atmosfera (ppm) apresentada por VAN VUUREN *et al.* (2011) para o mesmo cenário.

5.3.3.4.1. Tratamento do Parâmetro de Concentração de CO₂ na Atmosfera – Cenário Futuro

Foi feita uma média climatológica das projeções de concentração de CO₂ atmosférico, considerando o período coletado do cenário projetado (janeiro de 2006 a dezembro de 2035), a qual foi utilizada nas simulações dos cenários futuros.

5.3.4 Levantamento de Dados Edáficos (FASE 2)

Os dados de solo coletados foram para dois tipos de simulações.

A primeira coleta de dados é relativa ao tipo de solo utilizado no experimento 1 e 2 de medidas da evapotranspiração. Assim sendo, em observância com o solo declarado por CRUZ (2005), foi utilizado o solo que, pela classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), é classificado como Argissolo Vermelho para a análise das simulações de evapotranspiração realizadas pelo modelo DSSAT-CSM, as quais foram posteriormente comparadas aos experimentos 1 e 2.

Já para a segunda coleta os dados coletados foram coletados de acordo com a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Segundo a ANA (2013) existem três tipos de solo predominantes na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, que pela classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), são classificados como: Latossolo, Argissolo e Cambissolo, cobrindo 63%, 18% e 10% da área total da bacia.

Como existem muitos tipos de solo e muitas práticas de manejo agrícola sendo feitas na região, as quais podem alterar as propriedades físicas do solo como mostrado por RESCK *et al.* (1997); STONE & SILVEIRA (1999); OLIVEIRA *et al.* (2015). A escolha do solo foi baseada no tipo de solo predominante na bacia: o Latossolo. De acordo com a ANA (2013), este tipo de solo é o que apresenta a maior concentração de plantio da cana-de-açúcar na área da bacia.

Desta forma, foi utilizado o Latossolo Vermelho Amarelo, o qual foi cadastrado pela EMBRAPA dentro do DSSAT/CANEGRO.

5.3.5 Levantamento de Dados da Cultura da Grama-Batatais (FASE 2)

Os dados referentes à grama-batatais foram coletados para fazer as simulações relacionadas com os experimentos de lisímetro 1 e 2, e foram colhidas no próprio modelo DSSAT-CSM, que já possuía estes dados cadastrados.

5.3.6 Levantamento de Dados da Cultura da Cana-de-Açúcar (FASE 2)

Como mostrado no item 5.2, a cana soca está presente em um maior número de ciclos do cultivo da cana-de-açúcar, o que tem como consequência uma maior incidência e representatividade da cana soca em um estudo de longo prazo. Assim, a mesma foi escolhida para ser utilizada neste estudo.

Além da escolha entre a cana planta ou a cana soca, foi selecionado também uma cultivar que pudesse retratar com maior acurácia o cenário do cultivo da cana na bacia hidrográfica do Paranaíba.

Todavia, existem na atualidade diversas cultivares de cana-de-açúcar que são aptas ao plantio (RIDESA, 2019). Segundo VAN DILLEWIJN (1952); INMAN-BAMBER & JAGER (1986), as cultivares de cana-de-açúcar apresentam respostas diferentes quando colocadas sobre uma mesma condição meteorológica. Por exemplo, VAN DILLEWIJN (1952) cita que entre as cultivares foi observado diferentes taxas de germinação para uma mesma temperatura; e diferentes taxas de crescimento foliar quando sob as mesmas condições climáticas.

Com isso, a escolha da cultivar utilizada nesta tese se baseou também na representatividade da mesma no quadro Nacional.

Segundo o censo varietal (RIDESA, 2019), na última safra 2017/2018, na safra de 2016/2017 e na de 2015/2016, a cultivar RB867515 foi uma das que mais se destacou

no setor, tendo sido encontrada em 25% da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil.

Desse modo, a RB867515 foi escolhida para ser aplicada no estudo da tese, e para tanto, levou-se em consideração as calibrações feitas por MARIN *et al.* (2014) para o modelo DSSAT/CANEGRO. MARIN *et al.* (2014) ressalta que a calibração foi feita com medidas em experimento de campo sobre a fenologia, a população de colmos, a cobertura do dossel e as frações de partições de biomassa”.

5.3.7 Levantamento dos Dados de Manejo (FASE 2)

Para os dados de plantio, utilizou-se um espaçamento de 1.5 m entre as fileiras, para que fosse passível à mecanização, como mencionado por BEAUCLAIR & SCARPARI (2006). Já a profundidade do sulco utilizada é de 25 cm e a quantidade de mudas utilizada na simulação foi de 15 perfilhos/m², como recomendado pela EMBRAPA (2018).

O cultivo da cana-de-açúcar foi analisado para um regime de sequeiro. As datas de plantio foram baseadas na metodologia feita por MARIN *et al.* (2013), sendo plantado no dia 15 de Maio (plantio antecipado); no dia 15 de Agosto (plantio médio); e no dia 15 de Novembro (plantio tardio), com a colheita indo de Maio a Novembro. Tais datas foram selecionadas por representarem os principais ciclos da cana soca, como mencionado pelo autor.

5.3.8 Levantamento dos Dados de Produtividade (FASE 2)

Para analisar o impacto da inserção de uma nova equação de evapotranspiração dentro do modelo de sistema agrícola foi necessário fazer a coleta das informações da produtividade da cultivar RB867515 no local estudado.

Desse modo, foram coletados dados da produtividade (t/ha) de duas usinas de etanol na região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba: a Usina Rio Verde – Goiás e a Usina Serranópolis, as quais gentilmente concederam os dados. O período dos dados de produtividade de cada safra fornecido pela usina Serranópolis vai de 2011 a 2017, já o período da usina Rio Verde-Goiás vai de 2007 a 2009.

5.4 Métodos Aplicados

5.4.1 Fase 1: A Equação de Evapotranspiração

Como observado no Capítulo II, foi feita uma profunda revisão bibliográfica sobre as equações que estimam a evapotranspiração e, com base nisso, foi possível constatar que nem sempre a equação de FAO 56-Penman-Monteith pode ser aplicada ou detém o melhor desempenho. Assim, seguindo as premissas apresentadas no Capítulo II, a equação de PRIESTLEY-TAYLOR (1972) foi selecionada para a tese.

Porém, como mostrado por alguns autores como GAVIN & AGNEW (2004); VILLA NOVA & PEREIRA (2006), a calibração e o ajuste da equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) traz benefícios ao desempenho da estimativa. Assim, utilizando os dados lisimétricos foi iniciada a calibração da equação.

Vale ressaltar que a equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) não foi apenas calibrada, mas também foi feita uma análise das equações das variáveis que a compõe, com a finalidade de encontrar uma equação que possuísse características que considerassem a influência das mudanças climáticas.

Desse modo, foi empregada uma nova equação da declinação de curva da pressão de saturação do vapor d'água, no lugar das que são costumeiramente utilizadas para o cálculo de PRIESTLEY & TAYLOR (1972). Sendo esta nova equação específica para ambientes de estufa, possuindo características de maior semelhança com um cenário de mudanças climáticas. Essa equação pode ser encontrada no Capítulo II, (Equação 28), a qual pertence à metodologia de STANGHELLINI (1987).

A equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) foi calibrada, a princípio, para o verão, com o parâmetro α igual a 3.27 (Equação (41)).

Levando em consideração o fato de que PRIESTLEY & TAYLOR (1972) é um cálculo baseado fortemente na radiação. Uma análise exploratória da variação do parâmetro α em relação à sazonalidade da radiação solar extraterrestre foi avaliada.

Desse modo, a análise exploratória baseou-se na razão da radiação solar no topo da atmosfera entre os solstícios de inverno e de verão, bem como na razão dos equinócios. Tais razões foram utilizadas como fator multiplicativo sazonal para o inverno, primavera e outono considerando o valor calibrado para o verão.

Para a calibração da equação para o inverno, considerou-se o valor aproximado de 1.9, advindo da razão do valor da radiação solar no topo da atmosfera entre os solstícios

de verão e de inverno, sendo esse valor multiplicado ao parâmetro α da equação de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) calibrado para o verão (Equação (42)).

O mesmo procedimento aplicado ao inverno para a calibração do parâmetro α foi feito para a primavera e para o outono, com a única diferença de que se considerou o valor aproximado de 1.2, advindo razão do valor da radiação solar extraterrestre entre os equinócios. (Equação (43)).

Após essa calibração, foi feita a validação da metodologia de cálculo da evapotranspiração da equação de Priestley & Taylor modificada. A mesma pode ser observada através das (Equações 41-43), como mostrado a seguir:

Para o verão:

$$ET_0 = (3.27 * (\Delta/(\Delta + 0.68)) * (R_n - G))/\lambda \quad \text{Equação (41)}$$

Para o inverno:

$$ET_0 = (6.2 * (\Delta/(\Delta + 0.68)) * (R_n - G))/\lambda \quad \text{Equação (42)}$$

Para a primavera e outono:

$$ET_0 = (3.92 * (\Delta/(\Delta + 0.68)) * (R_n - G))/\lambda \quad \text{Equação (43)}$$

Considerando a (Equação 27),

$$\Delta = 0.04145 * e^{0.06088 * T} \quad \text{Equação (28)}$$

Em que: ET_0 é a evapotranspiração [mm dia^{-1}]; Δ é a declinação da curva de pressão do vapor d'água [$\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$]; γ igual a 0.68 é a constante psicrométrica [$\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$]; R_n é o balanço de radiação solar [$\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$], G é o fluxo de calor no solo [$\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$]; λ é o calor latente de vaporização [cal g^{-1}].

5.4.1.1 Validação da Equação de Evapotranspiração (FASE 1)

As equações de PRIESTLEY & TAYLOR (1972), FAO56-Penman-Monteith e Priestley & Taylor modificada foram comparadas quanto ao seu desempenho em relação aos dados observados de lisímetro.

Para tanto, foram feitas algumas análises estatísticas. Como recomendado por CAMARGO & SENTELHAS (1997), foram utilizados o índice de concordância de WILMOTT *et al.* (1985) (Equação 44); o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 45); o coeficiente de determinação (Equação 46); o índice de desempenho de CAMARGO & SENTELHAS (1997) (Equação 47); além da Raíz do Erro Quadrático Médio (Equação 48).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|\hat{Y}_i - \bar{Y}|) + (|Y_i - \bar{Y}|)]^2} \quad \text{Equação (44)}$$

Em que: d é o índice de concordância; \hat{Y}_i é o valor estimado; Y_i é o valor observado; \bar{Y} é a média do valor observado; n é o número de observações.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \quad \text{Equação (45)}$$

Em que: r é coeficiente de correlação Pearson; P_i é o valor estimado; O_i é o valor observado; \bar{O} é o valor médio observado.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \right)^2 = r^2 \quad \text{Equação (46)}$$

Em que: R^2 é o coeficiente de determinação; r é coeficiente de correlação Pearson; P_i é o valor estimado; O_i é o valor observado; \bar{O} é o valor médio observado.

$$C = r \cdot d \quad \text{Equação (47)}$$

Em que: C é o índice de Camargo, r é o coeficiente de correlação de Pearson e d é o índice de determinação de Wilmott.

$$REQM = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad \text{Equação (48)}$$

Em que: REQM é a Raíz do Erro Quadrático Médio; N é igual ao número de observações; O_i são os dados calculados; P_i são os dados coletados.

Gráficos de dispersão foram gerados entre os dados observados e as equações de Priestley-Taylor modificada e FAO -56 – Penman-Monteith.

5.4.2 FASE 2: O Modelo DSSAT/CANEGRO

Depois da revisão bibliográfica sobre a temática de modelagem de sistemas agrícolas, o modelo de sistema agrícola selecionado para o estudo foi o modelo DSSAT/CANEGRO, como mencionado no Capítulo III. A versão 4.5 foi escolhida, por ser a mais estável na época em que foram feitas as simulações.

O código do DSSAT/CANEGRO versão 4.5 para Linux está em linguagem FORTRAN 90. Com isto, para inserção da equação de estimativa de evapotranspiração dentro do modelo foi necessário escrever um script na mesma linguagem e, para não modificar todo o código, uma das sub-rotinas pré-existentes foi substituída pela nova sub-rotina com as (Equações 41-43), dentro do módulo PET.for, obedecendo o nome de cada variável pré-existente dentro do modelo e criando novas variáveis.

Além disso, para a equação da curva da pressão de saturação do vapor (Equação (28)), outra sub-rotina teve que ser modificada e ser chamada pela sub-rotina que calcula a evapotranspiração no módulo PET.for.

Os arquivos de extensão SCX, os quais correspondem aos experimentos que são rodados pelo modelo DSSAT/CANEGRO, foram criados especificamente para as rodadas da tese. Os experimentos expressam as simulações referentes à análise de sensibilidade do modelo em razão da modificação da equação de evapotranspiração e as simulações dos cenários climatológico e de mudanças climáticas que proveram os parâmetros para a formulação do zoneamento agroclimático.

O DSSAT/CANEGRO simulou o cultivo da cana-de-açúcar em diferentes cenários e localidades dentro e fora da bacia, tendo como finalidade a obtenção dos resultados de evapotranspiração de referência (mm/dia), da necessidade hídrica (mm/dia) e da produtividade (t/ha).

5.4.2.1 Análise de Sensibilidade do Modelo

Para a análise de sensibilidade do modelo DSSAT-CSM e DSSAT/CANEGRO foram feitas ao todo 22 simulações.

5.4.2.1.1 Análise de Sensibilidade do Modelo - Evapotranspiração

Duas simulações foram feitas para avaliar o desempenho da equação de estimativa de evapotranspiração dentro do modelo DSSAT-CSM, uma simulação com a equação Priestley & Taylor modificada nesta pesquisa, e outra simulação com a equação de FAO

56-Penman-Monteith. Com o intuito de avaliar este desempenho frente aos dados lisimétricos do primeiro experimento, de CARVALHO *et al.* (2009), foram considerados os dados meteorológicos observados para a localidade do experimento do autor (na latitude 22°48'S e na longitude 43°41'O); os dados de cultivo, que no caso correspondiam à grama batatais (*Paspalum Notatum*) parametrizados de acordo com as especificações do experimento de CARVALHO *et al.* (2007) e CARVALHO *et al.* (2009), como mencionado no item 5.3.5; e os dados de solo como descrito no item 5.3.4. Ambas as simulações foram feitas para o período de 30 de junho de 2006 a 30 de junho de 2007.

Os dados do segundo experimento não foram utilizados devido à quantidade de dados disponíveis, sendo inferior a um ano de dados diários.

Para a análise de sensibilidade foram considerados o índice de concordância de WILMOTT *et al.* (1985) (Equação 43); o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 44); o coeficiente de determinação (Equação 45); o índice de desempenho de CAMARGO & SENTELHAS (1997) (Equação 46); além da raiz do erro quadrático médio (Equação 47), como recomendado por CAMARGO & SENTELHAS (1997).

Foram gerados também gráficos de dispersão entre as duas equações Priestley-Taylor modificada e FAO -56 – Penamn-Monteith em relação aos dados observados.

5.4.2.1.2 Análise de Sensibilidade do Modelo - Produtividade da Cana-de-Açúcar

As outras 20 simulações correspondem às simulações feitas para a avaliação do impacto da equação de Priestley-Taylor modificada sobre o resultado da produtividade da cana-de-açúcar simulada pelo DSSAT/CANEGRO, em comparação com a simulação feita com a equação de FAO 56-Penman-Monteith.

Para tanto, foram utilizados os dados meteorológicos observados das localidades das usinas de Rio Verde (na latitude 17°50'S e na longitude 51°04'O) e Serranópolis (na latitude 18°23'S e na longitude 52°06'O). Os dados de solo foram os mesmos dados utilizados para fazer o restante das simulações, sendo considerado o solo apresentado no item 4.3; o cultivo escolhido que foi a cana-de-açúcar sendo parametrizada para a cultivar RB867515, que é a cultivar utilizada nos dados de produtividade fornecidos por estas duas usinas; e as datas de plantio vão de acordo com as datas de plantio dos dados observados.

Para a análise de sensibilidade foram considerados: o erro absoluto médio percentual (MAPE) (Equação 49), o coeficiente de correlação de Pearson (Equação 45),

o coeficiente de determinação (Equação 46) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (Equação 48).

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{O-F}{O} \right|}{N} * 100 \quad \text{Equação (49)}$$

Em que: MAPE é o erro absoluto médio percentual (%); O é o valor da observação; F é o valor da simulação; N é o número de simulações feitas.

Vale ressaltar que, para avaliar se o grau de melhora apresentado pela equação de evapotranspiração de Priestley & Taylor modificada foi significativo, foi utilizado o teste de significância (*t de Student*) bicaudal entre as médias independentes dos erros absolutos percentuais, com um nível de significância de 5%, (Equação (50)).

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^{1/2}} \quad \text{Equação (50)}$$

Em que: t é o t crítico do teste t; \bar{x}_1 é a média do erro absoluto médio do grupo 1; \bar{x}_2 é a média do erro absoluto médio do grupo 2; S_1^2 é o desvio padrão do grupo 1; S_2^2 é o desvio padrão do grupo 2; n_1 é o tamanho da amostra do grupo 1; n_2 é o tamanho da amostra do grupo 2.

Após essa análise de sensibilidade foram feitas as simulações forçadas pelo cenário climatológico observado, histórico e de mudanças climáticas, totalizando 36 simulações. Porém, como o modelo DSSAT trabalha de forma pontal, foram necessárias 3900 simulações para atingir todos os pontos da bacia.

5.4.2.2 Tratamento dos Resultados do Modelo DSSAT/CANEGRO

Como mencionado no item 5.4.2.1.2, o DSSAT/CANEGRO roda seus experimentos pontualmente. Desta forma, depois de feita a simulação, os resultados do DSSAT precisaram ser especializados para a formulação dos mapas que serviram de base ao ZAPAC.

Para tanto, um novo script foi criado em FORTRAN-90 para formatar os resultados do DSSAT/CANEGRO, que seriam utilizados dentro do programa GrADS (DOTY & KINTER, 1992). Outro script em formato *shellscript* foi gerado para a formulação dos mapas no GrADS. A espacialização foi feita através do método da análise objetiva de Cressman (CRESSMAN, 1959), e a limitação da bacia foi

processada utilizando o programa de sistema de informação geográfica METEOINFO (WANG, 2014).

Em consequência disso, com os resultados da modelagem de sistemas agrícolas, foram gerados mapas da necessidade hídrica da planta (mm/safra) e da produtividade da cana-de-açúcar (t/ha).

5.5 Formulação do ZAPAC

5.5.1 Abordagens metodológicas do ZAPAC

Segundo BISHNOI (1989) e MARTINEZ *et al.* (2016), existem diversas abordagens que podem ser assumidas dentro de um zoneamento agroclimático. BISHNOI (1989) vai ainda mais longe e cita que devido à essa existência de inúmeras técnicas aplicadas na formulação de um zoneamento agroclimático, torna-se muito difícil o desenvolvimento de um método universal de zoneamento agroclimático.

Para BRUNINI (2009), o zoneamento agroclimático deve obedecer aos seguintes passos: (1) Coleta de dados meteorológicos (climatologia), (2) Cálculo do balanço hídrico, (3) Averiguação das necessidades do cultivo relacionadas ao clima, (4) comparação entre o (1) e o (3) com a formulação de mapas. As classes das zonas se subdividem em: (adequada) quando as condições climáticas (em macroescala e mesoescala) propiciam o uso comercial do cultivo; (restritas) quando as condições climáticas restringem algum estágio fenológico do cultivo, porém não causando implicações drásticas ao cultivo e (inadequado) quando o clima ocasiona severas limitações ao cultivo.

Já para PEREIRA *et al.* (2001), a formulação do ZAPAC segue os seguintes passos: (1) definição da região que será estudada, (2) objetivos, (3) escala geográfica do estudo, (4) observação das necessidades climáticas da cultura estudada, (5) coleta dos dados climáticos da região estudada, (6) formulação da carta climática, (7) formulação do zoneamento. Os autores citam que as classes das zonas agroclimáticas podem ser divididas em: (apta) sem restrições hídricas e térmicas; (marginais) quando há limitações ao cultivo, porém não impossibilitam o cultivo; e (inapta) quando as limitações são intensas ao ponto de impossibilitar o cultivo.

PEREIRA *et al.* (2001) menciona ainda que esses passos são os mais utilizados no País, apesar de existirem outras abordagens como o uso de complexos índices

bioclimáticos na formulação do ZAPAC, ou ainda a utilização de mapas como os de uso do solo como material suplementar.

Já HOUDE & MOSSE (1937) *apud* BISHNOI (1989) utilizam outra abordagem, em que um zoneamento agroclimático leva em consideração um complexo índice K, que avalia a produtividade de um determinado cultivo.

Mesmo em vista destas diferenças entre as abordagens metodológicas, o conceito de zoneamento agroclimático é concordante na literatura em termos da aptidão climática do cultivo, em escala macro/mesoclimática. Sendo capaz de identificar áreas de maiores e menores riscos climáticos, definir o calendário agrícola e identificar as zonas com maior potencial produtivo (WOLLMAN *et al.*, 2013; MDA, 2008; RIDDLE, 2008).

5.5.2 Abordagem escolhida para formulação do ZAPAC

O ZAPAC foi formulado com base nos níveis de déficit hídrico e temperatura anual média, estabelecidos pelo Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (Tabela 2), (MANZATTO *et al.* 2009).

Tabela 2: Metodologia utilizada para a formulação do ZAPAC, baseada em MANZATTO *et al.*, (2009).

Baixo Risco- Sem limitação ao cultivo - Área apta 19°C < Temperatura do ar média anual Deficiência Hídrica < 200 mm;
Médio Risco- Irrigação de salvamento – Área apta com restrições 19°C < Temperatura do ar média anual 200 < Deficiência Hídrica < 400 mm;
Alto Risco- Carência Térmica– Área inapta 19°C > Temperatura do ar média anual Deficiência Hídrica >400 mm;

Assim, um novo script em *shellscript* foi gerado com os limites estabelecidos pelo ZAPAC, para ser utilizado no GrADS, o qual gerou os mapas finais do ZAPAC.

5.6 Análise da Expansão da Cana-de-Açúcar sobre a bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Mapas de produtividade foram confeccionados para servir como ferramenta auxiliadora à avaliação do ZAPAC. Desse modo, foram avaliados os diferentes níveis de produtividade da cana-de-açúcar, os quais indicam a aptidão da cana-de-açúcar dentro da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

Sendo feita a seguinte averiguação: as áreas devem ter no mínimo uma produtividade de 60 (t/ha), a qual foi assumida como um valor mínimo para assegurar uma eficiência produtiva por MANZATTO *et al.* (2008).

Com o auxílio dos mapas do ZAPAC, do mapa da produtividade e do mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, foi feita a análise das possíveis Unidades de Conservação Ambiental que poderiam ser acometidas pela expansão da cana-de-açúcar, bem como a avaliação do atual uso do solo das possíveis áreas de expansão. Sendo assim, analisadas as possíveis estratégias para que a expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar ocorra de forma a causar o menor impacto ambiental possível.

5.7 Comparação entre as Pesquisas

Com os mapas de aptidão da cana-de-açúcar de TAYT-SOHN *et al.* (2018) (Figuras 12 e 13) e com os mapas gerados nesta tese, foi feita uma comparação qualitativa em relação às diferenças de abordagem metodológica das possíveis áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar.

CAPÍTULO VI

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Inferência Estatística

Para o primeiro experimento da FASE 1 foi aplicada a inferência estatística das equações de estimativa de evapotranspiração. A equação modificada nessa tese que é baseada em PRIESTLEY & TAYLOR (1972), apresentou um desempenho superior em relação aos dados observados, em comparação ao desempenho da equação de FAO 56-Penman-Monteith.

A equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) apresentou uma correlação de Pearson (R) 10% maior, um coeficiente de determinação (R^2) 8% maior, um índice de Camargo (C) 13% maior, um índice de determinação de Willmott (d) 18% maior e uma raiz do erro quadrático médio (REQM) menor, conforme a Tabela (3).

Tabela 3: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM), com dados observados do experimento 1. Fonte: Elaboração própria.

Variáveis Estatísticas	PT mod	FAO56 – PM
R*	0.46	0.36
R²**	0.21	0.13
C***	0.32	0.19
d****	0.70	0.52
REQM*****	1.70	1.90

*correlação de Pearson (R), **coeficiente de determinação (R^2), ***coeficiente de Camargo (C), ****coeficiente de determinação de Willmott (d) e *****a raiz do erro quadrático médio (REQM).

Apesar dos valores das variáveis estatísticas de ambas as equações de evapotranspiração da Tabela (3) serem considerados baixos. Vale ressaltar que FAO 56-Penman-Monteith é considerada a equação mais recomendada, fisicamente a mais completa e que, mesmo assim, apresentou um desempenho inferior à equação de PRIESTLEY & TAYLOR modificada, para a região do experimento 1.

Para o segundo experimento, a equação de Priestley & Taylor modificada também apresentou um desempenho melhor do que o aquele apresentado pela equação FAO 56-Penman-Monteith, quando as duas equações foram comparadas aos dados observados.

Segundo SANTIAGO (2001), em períodos de chuva forte, a incerteza da medição nos lisímetro de pesagem aumenta consideravelmente. Devido a isso, a análise

estatística feita para o segundo experimento levou em consideração dois cenários de chuva, um cenário com os eventos de chuva forte e um segundo cenário sem os eventos de chuva forte. Assim, foi observado um aumento significativo da diferença do desempenho entre as duas equações, com um aumento nos valores da maioria das variáveis estatísticas, com exceção do erro quadrático médio que neste caso diminuiu nas duas equações, o que pode ser justificado através da diminuição do erro na coleta dos dados feita pela lisímetro. Corroborando assim, os resultados encontrados por SANTIAGO (2001).

Esse procedimento de análise de dois cenários com diferentes intensidades de chuva não pôde ser realizado para o primeiro experimento, devido a indisponibilidade de dados pluviométricos.

Para a análise estatística das duas equações em relação aos dados observados, para eventos com chuva forte, a diferença entre a correlação da equação de Priestley & Taylor modificada e a equação de FAO-56-Penman-Monteith foi de 3%, para o R^2 a diferença foi de 5%, REQM é menor, para o coeficiente de Camargo a diferença foi de 5%, e o índice de determinação de Wilmott foi de 3%, (Tabela 4) e na (Figura 16).

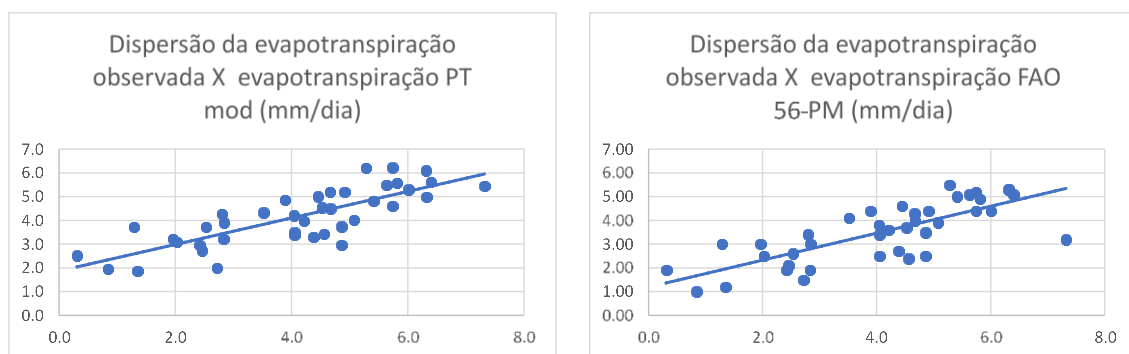


Figura 16: Gráfico de dispersão das estimativas de evapotranspiração Priestley-Taylor modificada (esquerda) e FAO -56- Penman-Monteith (direita) em relação aos dados observados de lisímetro para eventos com chuva forte.

Já na análise estatística do desempenho das duas equações de estimativa da evapotranspiração em relação aos dados observados, sem os eventos de chuva forte, ocorreu o aumento da diferença de desempenho entre as duas equações. Para a correlação de Pearson a diferença foi de 6%, para o R^2 a diferença foi de 8%, REQM é menor, para o coeficiente de Camargo a diferença foi de 10% e para o índice de determinação de Willmott foi de 6%, (Tabela 4) e na (Figura 17).

Tabela 4: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM), com dados observados do experimento 2. Fonte: Elaboração própria.

Variáveis Estatísticas	Com eventos de chuva forte		Sem eventos de chuva forte	
	PT mod	FAO56 – PM	PT mod	FAO56 – PM
R*	0.80	0.77	0.84	0.78
R²**	0.64	0.59	0.70	0.62
C ***	0.69	0.64	0.76	0.66
d****	0.86	0.83	0.91	0.85
REQM*****	1.02	1.21	0.96	1.22

*correlação de Pearson (R), **coeficiente de determinação (R²), ***coeficiente de Camargo (C), ****coeficiente de determinação de Willmott (d) e *****a raiz do erro quadrático médio (REQM).

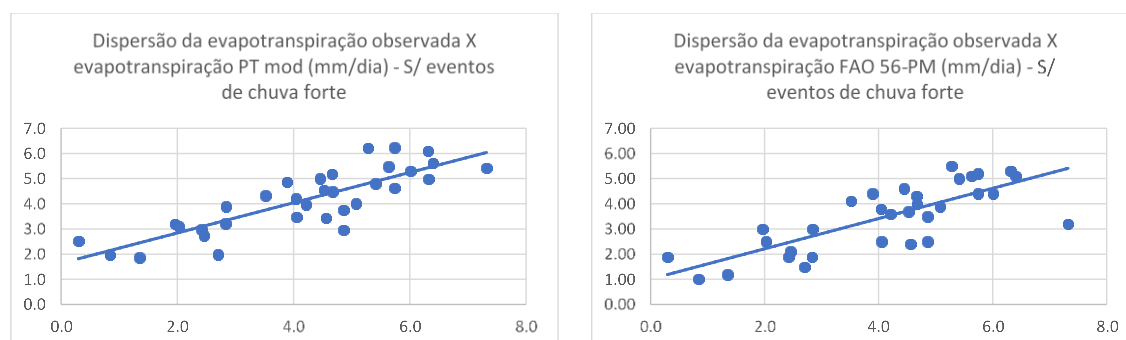


Figura 17: Gráfico de dispersão das estimativas de evapotranspiração Priestley-Taylor modificada (esquerda) e FAO -56- Penman-Monteith (direita) em relação aos dados observados de lisímetro sem eventos de chuva forte.

Assim, a equação de Priestley & Taylor modificada mostrou-se superior em todos os dois experimentos analisados, sendo selecionada para a inserção dentro do modelo DSSAT-CSM.

6.1.1 Análise de Sensibilidade da Evapotranspiração

As variáveis estatísticas das duas equações, calculadas em relação ao dado observado de produtividade, quando comparadas entre si mostraram que a equação de Priestley & Taylor modificada foi superior à FAO 56-Penman-Monteith para: R em 15%, R² em 14%, C em 11%, d em 7%; a REQM o valor foi menor, segundo a Tabela (5).

Assim, para o caso das duas simulações feitas, cada simulação com uma equação de evapotranspiração (Priestley & Taylor modificada e FAO56-Penman-Monteith), foi mostrado que a equação de Priestley & Taylor Modificada foi superior à equação de FAO56-Penman-Monteith.

Vale ressaltar que a equação de Priestley & Taylor modificada obteve melhor desempenho dentro do modelo de sistemas agrícolas. Já para a equação de FAO56-

Penman-Monteith ocorreu a situação contrária, como mostrado na Tabela (5) e na Figura 18.

Tabela 5: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM) dos resultados das Simulações do modelo DSSAT em relação aos dados observados do experimento 1. Fonte: Elaboração própria.

Variáveis Estatísticas	Estimativa calculada dentro do modelo		Estimativa calculada fora do modelo	
	PT mod	FAO56 – PM	PT mod	FAO56 – PM
R*	0.54	0.39	0.46	0.36
R²**	0.30	0.16	0.21	0.13
C***	0.31	0.20	0.32	0.19
d****	0.58	0.51	0.70	0.52
REQM*****	2.79	1.96	1.70	1.90

*correlação de Pearson (R), **coeficiente de determinação (R^2), ***coeficiente de Camargo (C), ****coeficiente de determinação de Willmott (d) e *****a raiz do erro quadrático médio (REQM).

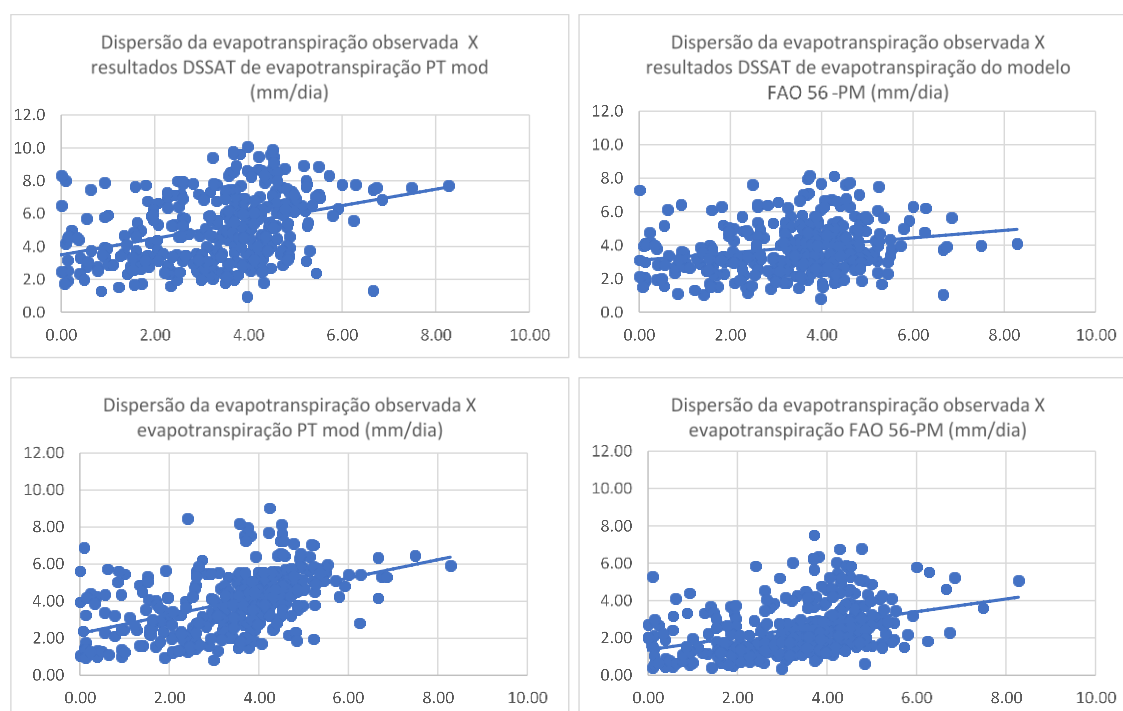


Figura 18: gráficos de dispersão do experimento 1 dos valores estimados pelas equações de Priestley-Taylor modificada (esquerda) e FAO-56- Penman-Monteith (direita) dentro do modelo DSSAT/CANEGRO (gráficos superiores) e fora do modelo (gráficos inferiores) em relação aos dados observados de lisímetro.

Foi possível observar tanto na análise estatística, quanto na análise de sensibilidade, que a equação de Priestley & Taylor modificada foi majoritariamente superior à de FAO 56-Penman-Monteith. Com exceção do valor de REQM dentro do modelo, que apresentou um menor valor para equação de FAO56-Penman-Monteith. Tal fato pode estar ligado à maneira como é estimada a radiação dentro do modelo, o que impacta diretamente a equação de Priestley & Taylor Modificada.

A análise de sensibilidade não se restringiu apenas na análise dos desempenhos das duas equações de evapotranspiração, mas também foi necessário fazer uma análise de sensibilidade das duas equações em relação ao desempenho dos resultados de produtividade, o qual é um dos principais resultados da modelagem de sistemas agrícolas DSSAT/CANEGRO.

6.1.2 Análise de Sensibilidade da Produtividade em Relação ao Emprego de uma Nova Equação de Evapotranspiração

No caso da usina Serranópolis, foram feitas duas simulações, em que cada simulação foi forçada por uma equação de evapotranspiração. As variáveis estatísticas aplicada as duas simulações em relação ao dado observado de produtividade, quando comparadas entre si, apresentam que a equação de Priestley & Taylor modificada obteve valores maiores do que FAO 56-Penman-Monteith para: R em 2%, R^2 em 1%, MAPE em 5%; o índice d não houve diferença no desempenho e para REQM o valor foi menor, apresentando um valor de 3% a menos, conforme Tabela (6).

Como a diferença entre os erros das duas equações apresentou um valor baixo, foi necessário inferir a significância estatística da diferença entre a média do erro absoluto percentual da equação de Priestley & Taylor modificada e da equação de FAO56-Penman – Monteith. Para tanto, foi utilizado o teste de significância (*t de Student*), com um nível de significância de 95%. Os resultados deste teste demonstraram que há significância estatística nessa diferença.

Tabela 6: Variáveis estatísticas e seus respectivos valores para a equação de Priestley & Taylor modificada (PT mod) e FAO 56-Penman-Monteith (FAO56-PM), com dados observados da Usina Serranópolis e da Usina Rio Verde. Fonte: Elaboração própria.

Variáveis Estatísticas	Usina Serranópolis		Usina Rio Verde -DECAL	
	PT mod	FAO56 – PM	PT mod	FAO56 – PM
R*	0.74	0.72	0.99	0.99
R²**	0.53	0.52	0.98	0.98
MAPE***	100.55	105.17	7.37	12.29
d****	0.09	0.09	0.91	0.86
REQM*****	103.96	107.17	8.07	13.19

*correlação de Pearson (R), **coeficiente de determinação (R^2), ***média do erro absoluto percentual (MAPE), ****coeficiente de determinação de Willmott (d) e *****a raiz do erro quadrático médio (REQM).

Já para o caso da usina Rio Verde, as variáveis estatísticas aplicada as duas simulações em relação ao dado observado de produtividade, quando comparadas entre si

mostraram que a equação de Priestley & Taylor modificada obteve valores superiores aos de FAO-56-Penman-Monteith em quase todas as variáveis. Para a correlação (R) e para o coeficiente R^2 não houve diferença, já para a MAPE houve diferença, em que o valor de Priestley & Taylor modificada ficou em torno de 5% menor; para o índice d também houve diferença no desempenho, sendo a equação de Priestley & Taylor modificada cerca de 5% maior, para a REQM o valor da diferença foi menor para equação de Priestley & Taylor modificada, com um valor de aproximadamente 5% a menos, conforme a Tabela (6).

Devido ao mesmo fator da diferença entre os erros das duas equações ter apresentado um baixo valor, também foi necessário inferir a significância estatística da diferença entre a MAPE da equação de Priestley & Taylor modificada e da equação de FAO56-Penman – Monteith. Para tanto, foi utilizado novamente o teste de significância (*t de Student*), com um nível de significância de 95%. Os resultados do teste de significância foram similares aos resultados da usina Serranópolis, demonstrando que há significância estatística nesta diferença. Como mostrado, há significância estatística nessas duas diferenças dos erros ainda que os valores sejam baixos. É importante mencionar que a despeito da melhora do desempenho observada no modelo DSSAT-CSM, quando utilizada a equação de Priestley & Taylor modificada, essa melhora não possui valores tão expressivos.

Tal situação dos baixos valores não invalida a melhoria de desempenho do modelo DSSAT-CSM, nem o esforço feito para a inserção da equação dentro do modelo de sistemas agrícolas, mesmo para análise da produtividade sob influência dos cenários de mudanças climáticas. Uma vez que, como mostrado no próprio relatório do grupo I do IPCC (na página 824), por exemplo, muitas vezes a melhora da modelagem, sequer ultrapassa 1% e mesmo assim é considerada significativa ao ponto de fazerem análises e formularem relatórios acerca dos novos resultados da modelagem.

Entretanto, LE TREUT *et al.* (2007) ressaltaram que, apesar da melhoria computacional e da própria modelagem, as simulações dos modelos ainda não conseguem fornecer dados que possam ser considerados como dados fidedignos à realidade.

Dessa forma, o modelo DSSAT-CSM pôde ser validado, mas não somente isso, como também apresentou um desempenho superior quando utiliza a equação de Priestley & Taylor modificada, em comparação com a equação de FAO 56-Penman-Monteith, para a região da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

Consequentemente, o modelo se mostrou pronto para fazer as simulações sobre diferentes cenários meteorológicos para a cana-de-açúcar, utilizando para tanto, a equação de Priestley & Taylor modificada.

6.2. Mapas da Temperatura média anual, da Produtividade da Cana-de-Açúcar e da Necessidade Hídrica

Os mapas produzidos nesta tese foram feitos direcionados para a formulação do ZAPAC e para sua avaliação. Com isso, foram gerados mapas da necessidade hídrica e da produtividade, confeccionados a partir dos resultados do DSSAT/CANEGRO; e o mapa da temperatura média anual, gerado a partir dos resultados dos modelos (RegCM4 e MPI ESM-RegCM4) para os cenários históricos e para os cenários de mudanças climática (RCP 8.5), e da reanálise 1, para o cenário climatológico.

6.2.1 Mapa da Temperatura Média Anual na Bacia hidrográfica do rio Paranaíba

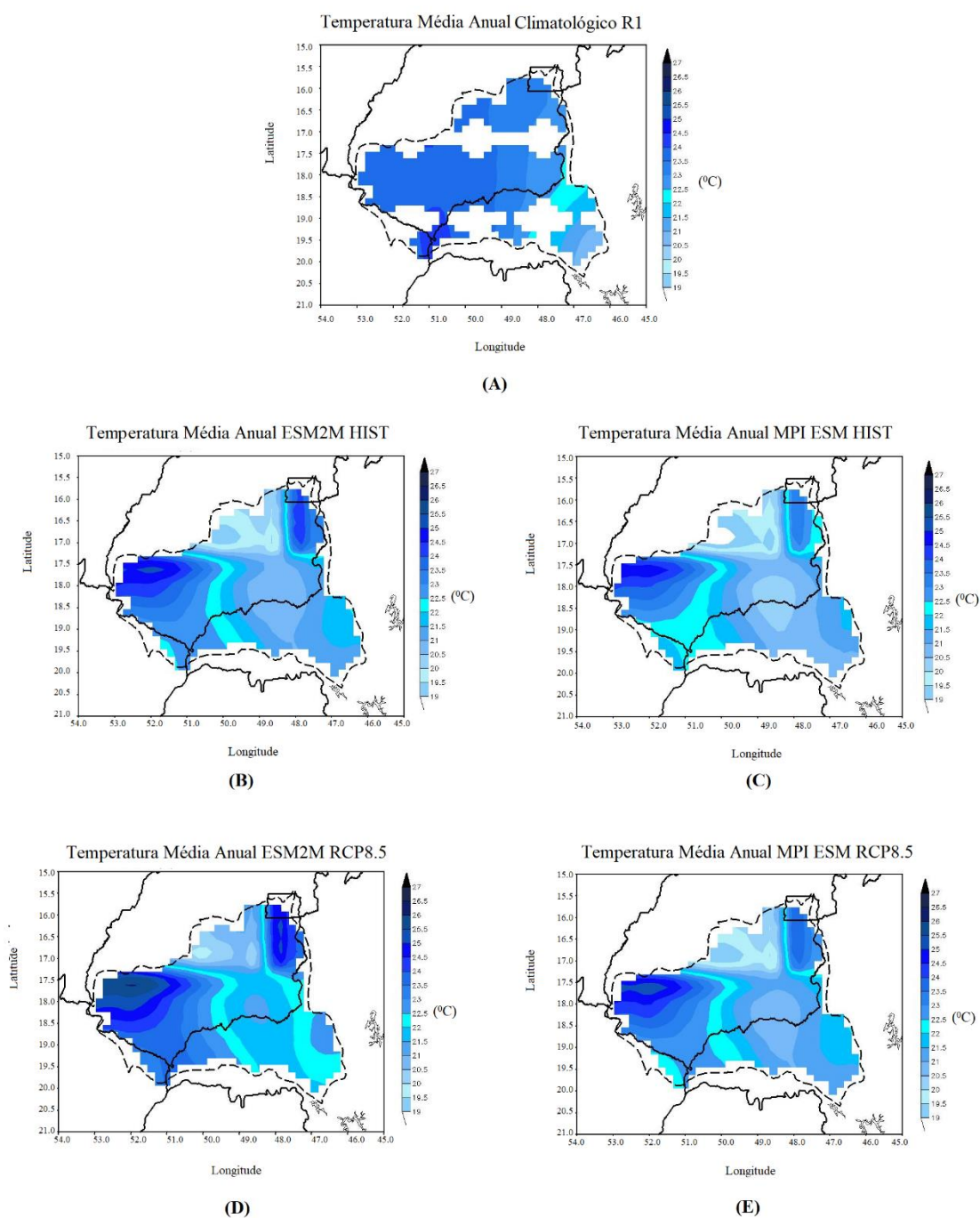


Figura 19: Mapas da temperatura média anual, na qual as temperaturas abaixo de 19 ($^{\circ}\text{C}$) estão representadas em branco, temperaturas entre 19 ($^{\circ}\text{C}$) e 26 ($^{\circ}\text{C}$) estão representadas em tons de azul e temperaturas acima de 26 ($^{\circ}\text{C}$) estão representadas em tons de vermelho, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria

Os mapas de temperatura média anual (Figura 19 A-E) apresentam na maioria do território temperaturas entre 19 ($^{\circ}\text{C}$) e 26 ($^{\circ}\text{C}$).

Para o caso climatológico, as saídas da reanálise mostram que os maiores valores de temperatura foram obtidos na região sudoeste da bacia (Figura 19 A).

É interessante observar que as mudanças de temperatura (RCP8.5-HIST) foram baixas para todos os dois modelos (ESM2M-RegCM4 e MPI ESM-RegCM4), representados pelas (Figuras 19 B, C, D, E). Além disso, em todos os cenários dos dois modelos as regiões que apresentaram os maiores valores de temperatura média anual nas regiões noroeste e nordeste da bacia.

No mapa das simulações do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (Figuras 19 B-D), a diferença entre o cenário de mudanças climáticas (RCP8.5) e o cenário histórico é mais pronunciada na região central e na região sul da bacia hidrográfica do rio Paranaíba. O mesmo padrão foi observado para as simulações do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM (Figuras 19 C-E).

Já na comparação entre os dois modelos considerando o cenário histórico, o modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M apresentou valores mais altos de temperatura média anual, principalmente no Noroeste da bacia e no Oeste da bacia a partir da longitude $50^{\circ}50'$.

Na comparação entre os dois modelos para cenário de mudanças climáticas RCP8.5, o padrão observado no cenário histórico se mantém, com as saídas do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M possuindo valores mais altos de temperatura média anual, principalmente no Noroeste e no Oeste da bacia.

6.3.2 Mapa da Necessidade Hídrica da Cana-de-Açúcar

6.2.2.1 Plantio em Maio

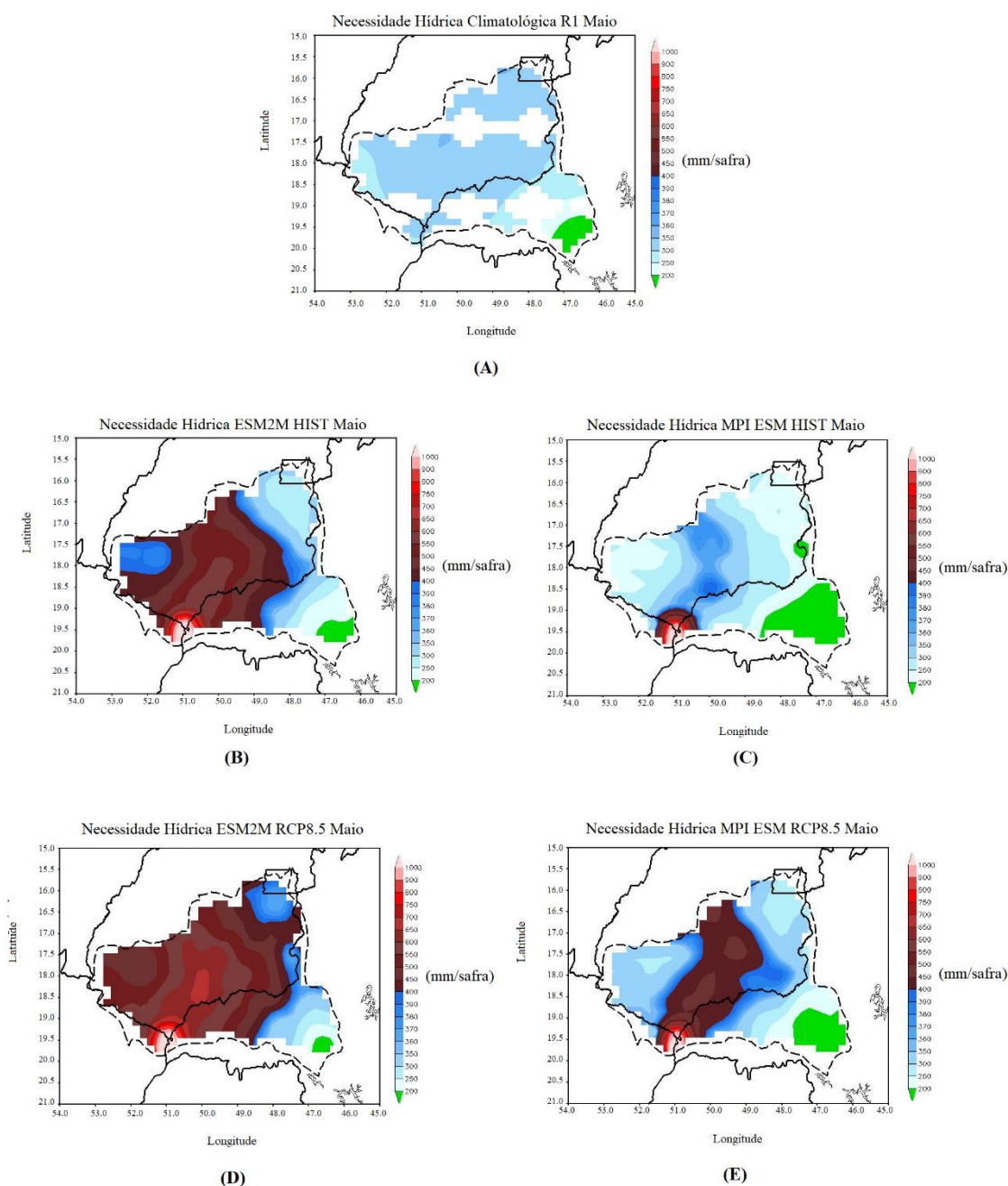


Figura 20: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Maio, sendo a deficiência hídrica abaixo de 200 (mm/safra) em verde, entre 200 (mm/safra) até 400 (mm/safra) em tons de azul, acima de 400 (mm/safra) representada por tons de vermelho, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

O mapa da necessidade hídrica climatológica da cana soca (RB867515), com base em dados advindos da reanálise, mostra que a região sudeste da bacia hidrográfica do rio Paranaíba apresentou baixa necessidade hídrica ao cultivo da cana-de-açúcar, porém o restante da bacia também apresenta valores que, para MANZATTO *et al.* (2009) seriam considerados aptos com restrição desde que empregada a irrigação por salvamento. Este mapa pode ser observado pela (Figura 20 A).

Já o mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada as variáveis do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (Figura 20 B), a região centro-oeste da bacia, com exceção da região noroeste, apresentou valores altos de necessidade hídrica para o cultivo da cana-de-açúcar. No entanto, a região sudeste da bacia apresentou baixa necessidade hídrica para o cultivo da cana-de-açúcar, sendo que partes da região leste apresentaram necessidade do uso da irrigação de salvamento. Esse cenário difere do cenário da necessidade hídrica climatológica com dados advindos da reanálise, pois apresentou valores superiores à necessidade hídrica na região central da bacia.

O mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM (Figura 20 C), também mostrou que a região sudeste da bacia como a região de menor requerimento hídrico. Em quase todo o resto da bacia o requerimento hídrico possui valores, no qual para o cultivo da cana seria necessário a utilização da irrigação de salvamento. Apenas no extremo sudoeste da bacia são encontrados valores considerados altos de necessidade hídrica da cana-de-açúcar. Esse cenário é mais condizente com o cenário climatológico advindo da reanálise do que o cenário das saídas do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M.

O mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 20 D), apresentou um agravamento do requerimento hídrico para o cultivo da cana-de-açúcar em praticamente toda a bacia em comparação ao cenário histórico (Figura 20 B), com exceção da região sudeste da bacia que mesmo possuindo uma diminuição da área ainda possui área de baixo requerimento hídrico ao cultivo da cana.

Para o mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 20 E),

também foi observado um agravamento da necessidade hídrica ao cultivo da cana-de-açúcar, quando comparado ao cenário histórico (Figura 20 C). Entretanto, a região em que ocorreu este agravamento de forma mais pronunciada foi apenas sobre a região central da bacia, pois, segundo MANZATTO *et al.* (2009), a área que no cenário histórico estava representada apenas como uma área de necessidade de irrigação de salvamento, no cenário de mudanças climáticas passa a necessitar de alta demanda hídrica. Vale ressaltar que, mesmo com o agravamento da necessidade hídrica em praticamente toda a bacia, a região sudeste da bacia apresenta baixos valores de demanda hídrica ao cultivo.

Na comparação entre as saídas dos dois modelos, para os dois cenários foi possível observar que os mapas que contém as simulações do modelo DSSAT/CANEGRO baseados nos resultados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, apresentaram necessidades hídricas mais baixas em quase toda a bacia, com exceção da região sudoeste da bacia, e para o cenário de mudanças climática RCP8.5 com exceção da região central da bacia.

6.2.2.2 Plantio em Agosto

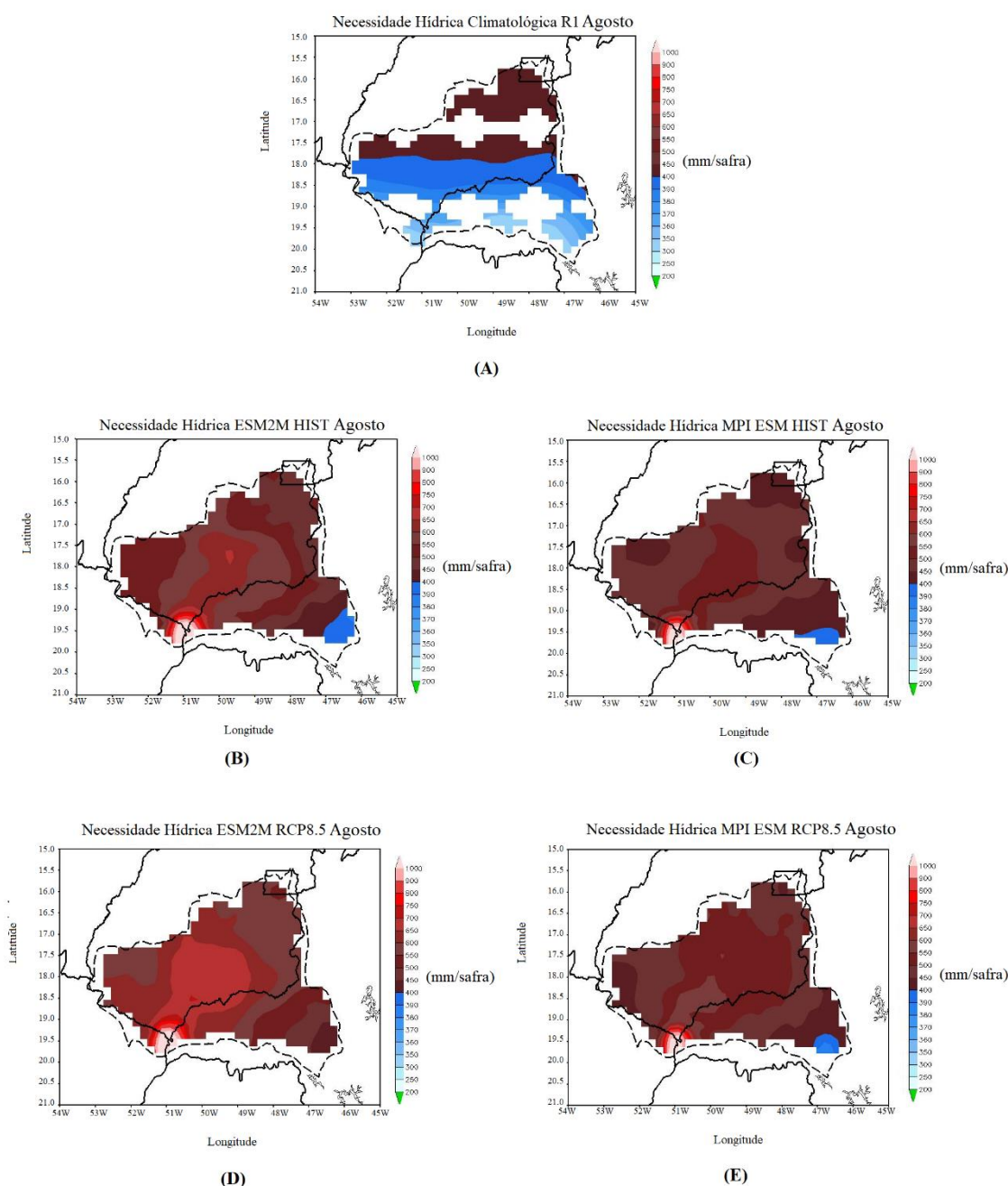


Figura 21: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Agosto, sendo a deficiência hídrica abaixo de 200 (mm/safr) em verde, entre 200 (mm/safr) até 400 (mm/safr) em tons de azul, acima de 400 (mm/safr) representada por tons de vermelho, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

O mapa da necessidade hídrica climatológica da cana soca (RB867515), com o plantio ocorrendo em agosto, apresenta alto requerimento hídrico ao cultivo da cana-de-

açúcar sobre a região norte. Já no restante da bacia, os valores demonstram que o cultivo da cana-de-açúcar na região demandaria irrigação de salvamento, o que segundo MANZATTO *et al.* (2009) estaria na faixa de aptidão com restrição, como mostrado pela (Figura 21 A).

O mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em Agosto (Figura 21 B), praticamente toda a área da bacia apresenta alta demanda hídrica ao cultivo da cana-de-açúcar, com exceção da região sudeste da bacia, que requer irrigação de salvamento. Nesse cenário há algumas divergências, quando comparado ao cenário climatológico, apresentando uma área de alta demanda hídrica muito maior.

Características similares podem ser observadas no mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM (Figura 21 C), com a diferença de que a região em que a demanda hídrica prevê a utilização de irrigação de salvamento possui sua localização mais a oeste da região sudeste da bacia; e que em partes da região nordeste, noroeste e central da bacia o requerimento hídrico ao cultivo da cana dá-se de forma menos intensa, ainda que seja considerada uma alta demanda hídrica segundo MANZATTO *et al.* (2009). Nesse cenário também é observada discrepâncias em relação ao cenário climatológico, apresentando uma área de alto requerimento hídrico bem maior.

No mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 21 D), há um agravamento do requerimento hídrico para o cultivo da cana-de-açúcar em comparação ao cenário histórico, onde toda a bacia tem uma demanda hídrica alta ao cultivo da cana-de-açúcar.

Para o mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 21 E), também é observado um agravamento da necessidade hídrica ao cultivo da cana-de-açúcar, quando comparado ao cenário histórico (Figura 21 C), porém há no sudeste da bacia uma pequena região em que o requerimento hídrico ao cultivo demanda a irrigação de salvamento, segundo MANZATTO *et al.* (2009).

Na comparação entre os mapas das saídas do DSSAT/CANEGRO que utiliza como dados de entrada os dados do modelo climático (Figuras 21 B-E) é possível observar que nos mapas em que o DSSAT/CANEGRO recebeu dados de entrada do modelo RegCM4 forçado pelo ESM2M são notadas áreas, principalmente na região central da bacia, com maior valor de requerimento hídrico (Figuras 21 B e D), do que naqueles em que os dados de entrada foram forçados pelo modelo MPI ESM (Figuras 21 C e D).

6.2.2.3 Plantio em Novembro

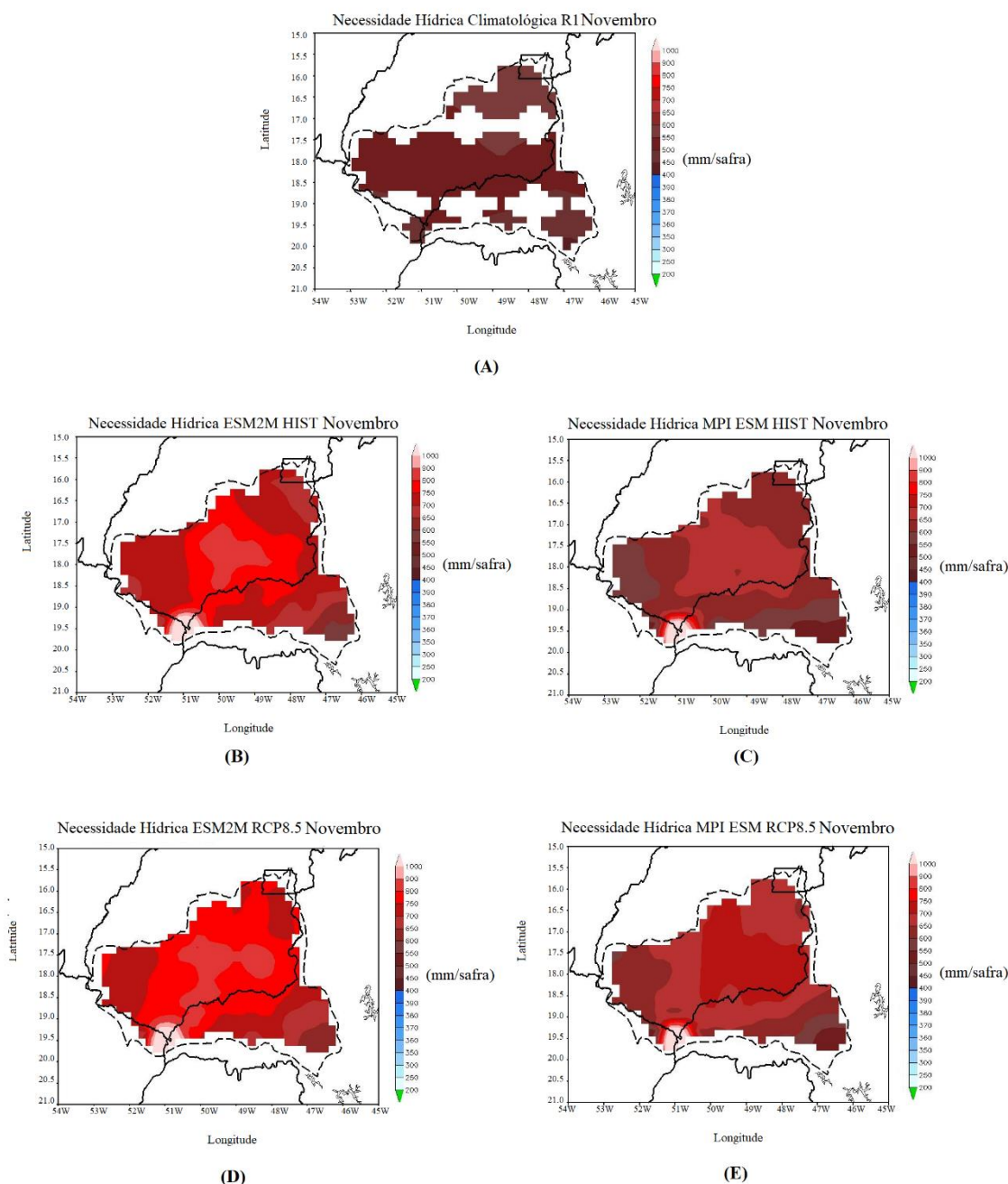


Figura 22: Mapas da necessidade hídrica da cana soca (RB867515) com plantio em Novembro, sendo a deficiência hídrica abaixo de 200 (mm/safr) em verde, entre 200 (mm/safr) até 400 (mm/safr) em tons de azul, acima de 400 (mm/safr) representada por tons de vermelho, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

O mapa da necessidade hídrica climatológica da cana soca (RB867515), com o plantio ocorrendo em novembro, apresenta alto requerimento hídrico ao cultivo da cana-de-açúcar sobre toda a região da bacia (Figura 22 A).

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em novembro (Figura 22 B), é possível observar que não há nenhuma área dentro da bacia com um índice de requerimento hídrico de cultivo que não seja alto. O alto valor de demanda hídrica encontrado neste mapa está condizente àquele encontrado no mapa climatológico (Figura 22 A), porém os padrões divergem, principalmente sobre a região central e sudeste.

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, (Figura 22 C) o padrão é similar ao encontrado na (Figura 22 B), porém os índices de requerimento, ainda que altos, são menores do que os encontrados na (Figura 22 B). Este mapa também mostra o mesmo índice apresentado no mapa climatológico (Figura 22 A), contudo o padrão não é semelhante com diferenças sendo observadas na região sul e central da bacia.

No mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 22 D), há o agravamento do requerimento hídrico para o cultivo da cana-de-açúcar em comparação ao cenário histórico, sendo a região nordeste e noroeste da bacia as mais afetadas pelo aumento do requerimento hídrico ao cultivo da cana-de-açúcar.

Já no mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 22 E), o agravamento da necessidade hídrica ao cultivo da cana-de-açúcar é ainda maior, possuindo uma pequena faixa na região sudeste da bacia que não apresentou variação quando comparado ao cenário histórico (Figura 22 C).

Na comparação entre os mapas das saídas do DSSAT/CANEGRO que utiliza como dados de entrada os dados do modelo climático (Figuras 22 B-E), é possível observar que nos mapas em que o DSSAT/CANEGRO recebeu dados de entrada do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M os valores de requerimento hídrico são maiores em toda a bacia do que aqueles encontrados nos mapas em que o

DSSAT/CANEGRO recebeu dados de entrada do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM.

6.2.3 Análise entre os Diferentes Mapas de Necessidade Hídrica

Sob a óptica de todos os mapas de requerimento hídrico analisados (Figuras 20 A-E, 21 A-E, 22 A-E), foi possível observar que, dentre todas as datas de plantio analisadas, a data de plantio que apresentou o resultado com o menor requerimento hídrico ao cultivo da cana soca (RB867515) foi maio.

No que diz respeito à localização onde o requerimento hídrico possui o menor valor, para todos os cenários analisados (Figuras 20 A-E, 21 A-E, 22 A-E), ela posiciona-se na região sudeste da bacia. Já a região que apresentou os maiores valores de requerimento hídrico ao cultivo da cana, em todos os cenários e datas de plantio, foi a região central da bacia.

6.2.4 Mapas da produtividade da Cana-de-Açúcar

Os mapas de produtividade se dividem em três grupos com diferentes datas de plantio: em maio, em agosto e em novembro, os quais serão apresentados nesta ordem nesta tese.

Cada figura de cada data de plantio contém cinco mapas relativos aos cinco cenários:

- (1) cenário climatológico advindo de reanálise,
- (2) cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M,
- (3) cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM,
- (4) cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M
- (5) e o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM.

6.2.4.1 Plantio em Maio

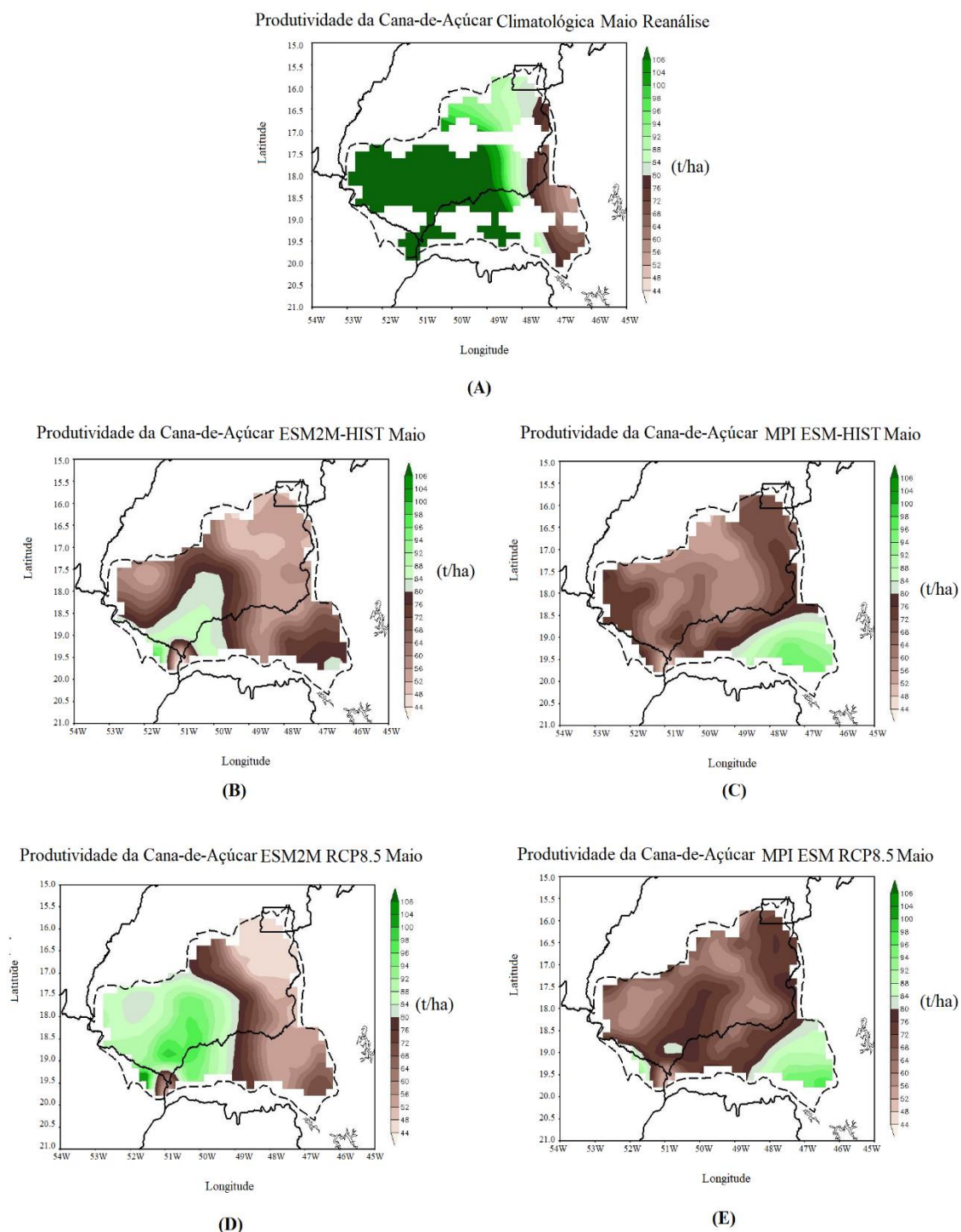


Figura 23: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Maio, com a produtividade acima de 80 (t/ha) representada por tons de verde, e abaixo de 80 (t/ha) em tons de marrom, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

No mapa da produtividade da cana soca (RB867515) é observado que apenas uma pequena parcela ao leste da bacia detém valores abaixo de 80 (t/ha) Figura (23 A).

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em maio Figura (23 B), é possível observar que a área de maior valor de produtividade da cana-de-açúcar está sobre a região sudoeste da bacia. As regiões nordeste e noroeste apresentam baixos valores de produtividade (abaixo de 60 (t/ha)), e a região sudeste da bacia apresenta valores de cerca de 80 (t/ha). O padrão deste mapa Figura (23 B) não está condizente com aquele encontrado no mapa climatológico Figura (23 A), excetuando-se a região sudoeste da bacia, mesmo que nesta área existem diferenças nos valores da produtividade.

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, Figura (23 C), a região que apresenta a maior produtividade é a região sudeste da bacia, sendo que na região central e sudoeste da bacia são encontrados baixos valores de produtividade (abaixo de 60 (t/ha)). Esse mapa tem um padrão diferente daquele encontrado no cenário climatológico Figura (23 A), sendo observado um padrão oposto ao encontrado no cenário climatológico.

No mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M sobre a influência do cenário RCP 8.5 Figura (23 D), há o aumento da área de maiores valores da produtividade da cana-de-açúcar na região oeste da bacia, porém a região nordeste da bacia está apresentando valores ainda mais baixos de produtividade (abaixo de 40 (t/ha)) e sobre a região sudeste da bacia estão sendo observados valores mais baixos de produtividade, em comparação ao cenário histórico (Figura 23 B).

Já no mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 23 E), é possível observar a diminuição da área de maior valor de produtividade sobre a região sudeste. Já em partes da região oeste houve o aumento da área de maior valor de produtividade, quando comparado ao cenário histórico (Figura 23 C). Ademais, este mapa (Figura 23 E) apresenta concordância no aumento da área sobre partes da região oeste com o mapa que foi forçado pelo modelo ESM2M (Figura 23 D).

Com a espacialização da produtividade da cana soca (RB867515) sobre a bacia hidrográfica do rio Paranaíba, foi possível constatar que os mapas referentes às (Figuras 23 B-E), apresentaram divergências quanto à localização que detém a maior e menor produtividade da cana-de-açúcar.

Os mapas que foram formulados a partir dos resultados do modelo DSSAT/CANEGRO, que recebe como dados de entrada a regionalização dos resultados do modelo ESM2M, tanto para o cenário histórico (Figura 23 B) quanto para o cenário RCP 8.5 (Figura 23 D), possuem semelhanças com o cenário climatológico (Figura 23 A) no quesito da localização da região de maior produtividade, estando posicionada na região sudoeste da bacia.

Já os mapas que foram formulados a partir dos resultados do modelo DSSAT/CANEGRO, recebendo como dados de entrada a regionalização dos resultados do modelo MPI ESM, apresentam a disposição oposta nos dois cenários (Figuras 23 C e E), em que os maiores valores de produtividade são observados do lado sudeste da bacia.

6.2.4.2 Plantio em Agosto

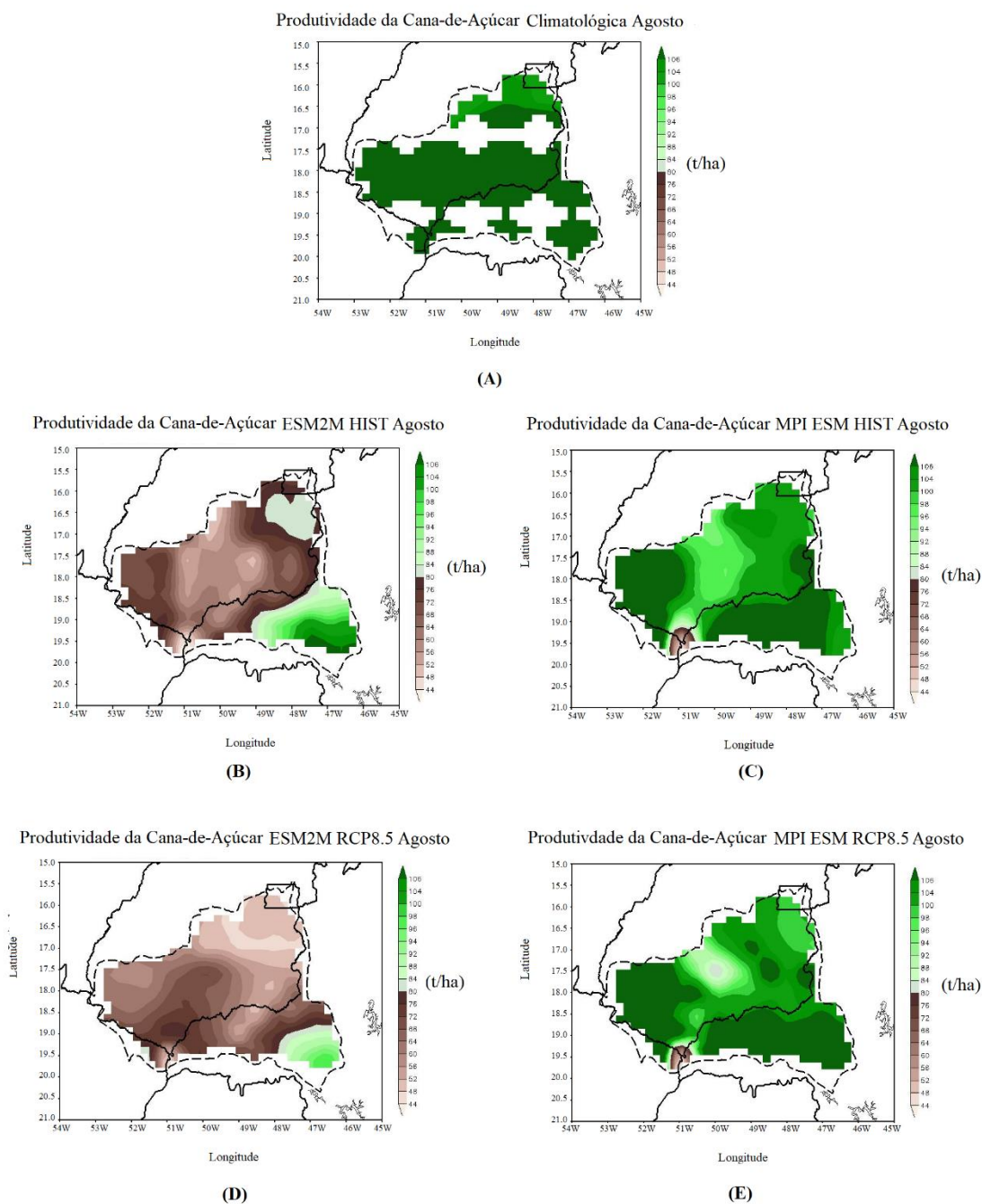


Figura 24: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Agosto, com a produtividade acima de 80 (t/ha) representada por tons de verde, e abaixo de 80 (t/ha) em tons de marrom, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

No mapa climatológico da produtividade da cana soca (RB867515) é observado que toda a região da bacia possui valores altos de produtividade (Figura 24 A).

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em agosto Figura (24 B), é possível observar que a área de maior valor de produtividade da cana-de-açúcar está sobre a região sudeste da bacia, as regiões nordeste e noroeste apresentam valores de produtividade de cerca de 80 (t/ha), e a região central da bacia possui baixos valores de produtividade da cana-de-açúcar (abaixo de 60 (t/ha)). A configuração observada neste mapa da Figura (24 B) só está condizente com o mapa climatológico da Figura (24 A) para a região sudeste da bacia, já que para o resto da bacia o mapa representado pela Figura (24 B) tem áreas com valores de produtividade menores do que os encontrados no mapa da Figura (24 A).

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, Figura (24 C) toda a região da bacia apresenta altos valores de produtividade, excetuando-se uma pequena parcela da região sudoeste da bacia. Apesar da configuração presente neste mapa não se assemelhar com a encontrada no mapa do cenário climatológico Figura (24 A), os dois mapas possuem os mesmos valores sobre áreas das regiões noroeste e nordeste da bacia.

No mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, sobre a influência do cenário RCP 8.5 (Figura 24 D), nesse mapa é observado que a região de maior produtividade ocorre no sudeste da bacia, e a região dos menores valores de produtividade está sobre o nordeste da bacia. Em comparação com o mapa do cenário climatológico Figura (24 B), o mapa da Figura (24 D) tem um aumento da área de maiores valores da produtividade da cana-de-açúcar na região centro-oeste da bacia, porém as regiões nordeste, sudeste e noroeste da bacia apresentam uma diminuição intensa dos valores de produtividade sobre a região nordeste, com valores abaixo de 40 (t/ha).

Já no mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, sobre a influência do cenário RCP 8.5 Figura (24 E), é possível observar que as regiões de maior valor de produtividade estão ao sul da bacia, com exceção de áreas da região sudoeste, que apresenta nessa bacia os menores valores de produtividade. Quando esse mapa é comparado ao mapa do cenário climatológico Figura (24 C), é possível observar que há a diminuição da área de maior valor de

produtividade sobre áreas da região central e da região nordeste, contudo sobre a região sudeste da bacia houve um pequeno aumento da área de maior valor de produtividade.

Com a espacialização da produtividade da cana soca (RB867515), sobre a bacia hidrográfica do rio Paranaíba, foi possível constatar que os mapas referentes às (Figuras 24 B-E), apresentaram divergências no padrão da localização e nos valores da produtividade da cana-de-açúcar. Os mapas que representam os resultados do DSSAT/CANEGRO que foram influenciados pelo modelo MPI ESM apresentam, em praticamente toda a bacia, valores de produtividade muito mais altos daqueles encontrados nos mapas das (Figuras 24 B e D)

6.2.4.3 Plantio em Novembro

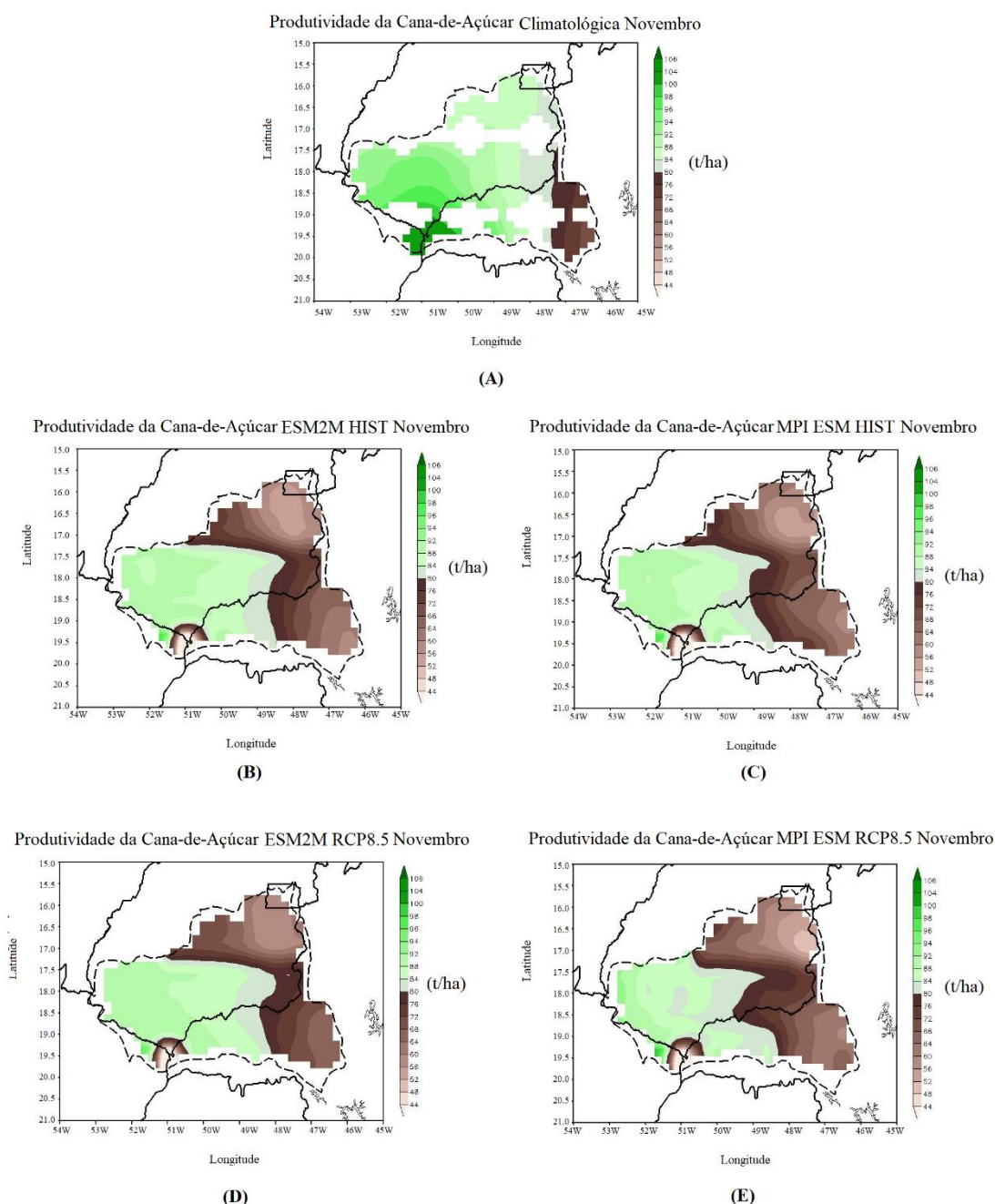


Figura 25: Mapas das produtividades da cana soca (RB867515) com plantio em Novembro, com a produtividade acima de 80 (t/ha) representada por tons de verde, e abaixo de 80 (t/ha) em tons de marrom, para o cenário climatológico com dados advindos da reanálise (A), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (B), para o cenário histórico do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (C), para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M (D) e para o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM (E). Fonte: Elaboração própria.

No mapa da produtividade da cana soca (RB867515) climatológica é observado que apenas uma pequena parcela ao leste da bacia detém valores abaixo de 80 (t/ha) Figura (25 A).

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em novembro Figura (25 B), é possível observar que a área de maior valor de produtividade da cana-de-açúcar está sobre a região oeste e central da bacia; já a região nordeste, uma diminuta área sobre a região sudoeste e as áreas da região sudeste da bacia apresentam valores de produtividade (abaixo de 60 (t/ha)). O padrão deste mapa Figura (25 B) não está condizente com aquele encontrado no mapa climatológico Figura (25 A), excetuando-se partes da região central e oeste da bacia, as quais possuem valores similares de produtividade.

No mapa do cenário histórico das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, Figura (25 C), o padrão espacial da produtividade é similar ao encontrado no mapa da Figura (25 B), em que a área de maior valor de produtividade da cana-de-açúcar está sobre a região oeste e central da bacia; já a região nordeste, uma diminuta área sobre a região sudoeste e as áreas da região sudeste da bacia apresentam valores de produtividade (abaixo de 60 (t/ha)). Consequentemente, a configuração desse mapa também é diferente daquele encontrado no mapa do cenário climatológico Figura (25 A), sendo observado que apenas partes da região central e oeste da bacia possuem valores similares de produtividade aos encontrados no mapa do cenário climatológico.

No mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO, que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M sobre a influência do cenário RCP 8.5 Figura (25 D), a área de maior valor de produtividade da cana-de-açúcar está sobre a região oeste e central da bacia; já a região nordeste e uma diminuta área da região sudoeste da bacia apresentam valores de produtividade (abaixo de 60 (t/ha)). Em comparação com o mapa do cenário histórico Figura (25 C), é possível observar que as mudanças no cenário de mudanças climáticas foram muito sutis, pois as maiores mudanças ocorreram sobre uma área centro-leste e em uma área da região nordeste da bacia.

Uma configuração similar a encontrada no mapa da Figura (25 D) também é observada no mapa do cenário de mudanças climáticas das saídas do modelo DSSAT/CANEGRO que utilizou como dados de entrada os dados do modelo RegCM4

forçado pelo modelo MPI ESM, sobre a influência do cenário RCP 8.5 Figura (25 E), onde as regiões de maior valor de produtividade estão localizadas nas regiões centrais e oeste da bacia e as regiões de menor valor de produtividade estão localizadas sobre as regiões nordeste, sudeste e uma diminuta área sobre uma área da região sudoeste. Essa configuração também é observada sobre o mapa da Figura (25 C), assim sendo, poucas modificações foram observadas entre o mapa do cenário histórico e o mapa do cenário de mudanças climáticas.

Para o plantio em novembro, a configuração apresentada entre os mapas das (Figuras 25 B-E) está muito similar, com as maiores áreas de produtividade localizadas nas regiões centrais e oeste da bacia.

6.2.5 Análise entre os Diferentes Mapas de Produtividade

Avaliando todos os mapas de produtividade da cana soca (RB867515) (Figuras 23 A-E; 24 A-E; 25 A-E), foi possível observar que dentre todas as datas de plantio analisadas, a data que apresentou os maiores valores de produtividade foi agosto.

No que concerne a questão da abrangência territorial das zonas que apresentam alta produtividade (acima de 80 (t/ha)), é possível verificar que agosto e novembro possuem os mapas com as maiores zonas de alta produtividade.

Com relação à localização onde a produtividade possui o maior valor, para todos os cenários analisados (Figuras 23 A-E; 24 A-E; 25 A-E), ela posiciona-se na região oeste da bacia, porém na maioria dos cenários a região sudeste da bacia possui desempenho relevante, muitas vezes ficando acima ou em cerca de 80 (t/ha). Já a região que apresentou os menores valores de produtividade da cana, em todos os cenários e datas de plantio, foi a região nordeste da bacia.

6.3 Zoneamento de Aptidão Climática da Cana-de-Açúcar

6.3.1 Aptidão Térmica da Cana-de-Açúcar

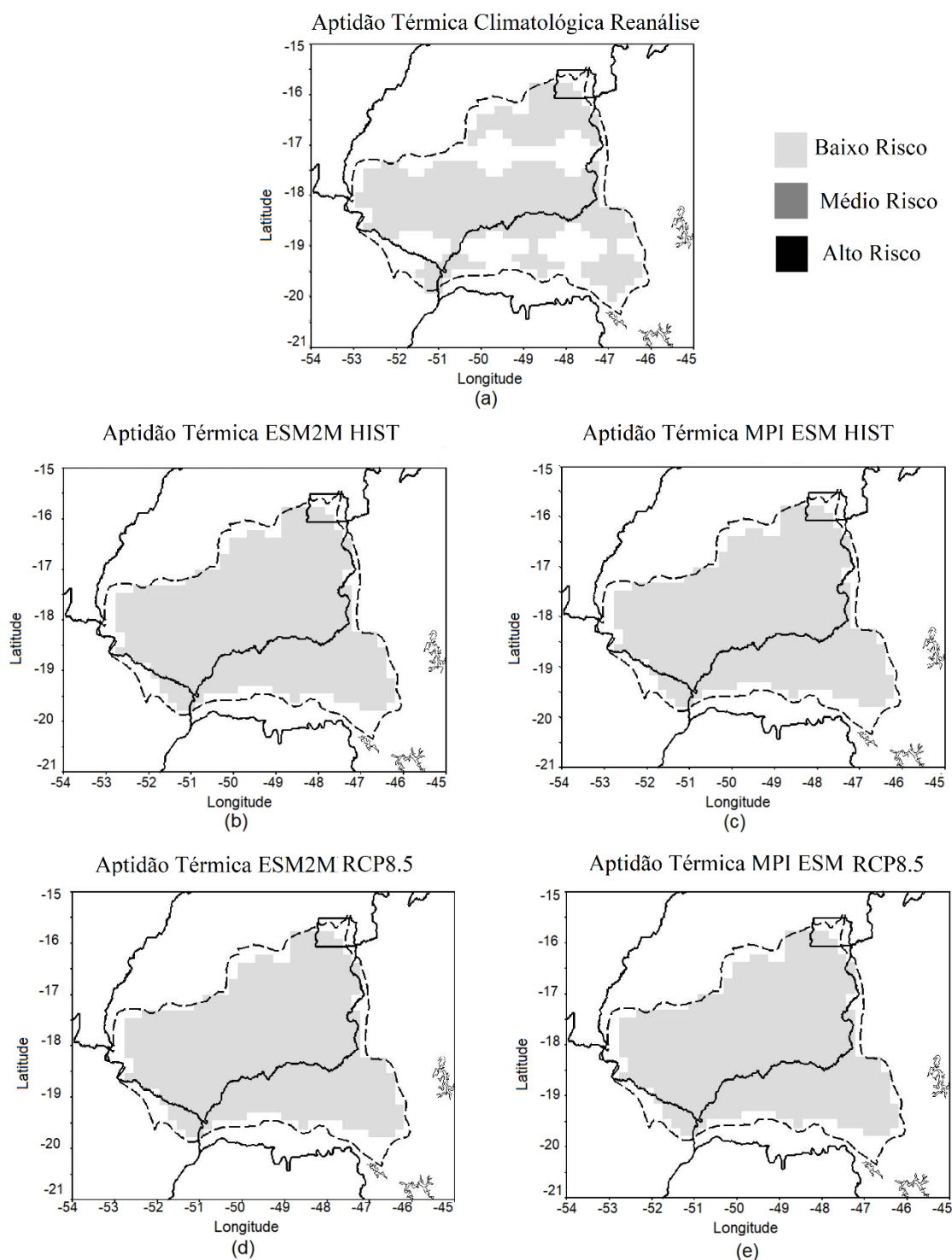


Figura 26: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515), para três níveis de risco: baixo (em cinza claro), médio (em cinza escuro) e alto (em preto), para os cenários: (A) climatológico com dados advindos da reanálise, (B) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, (C) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM, (D) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M e (E) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM. Fonte: Elaboração própria

Através da análise dos mapas da (Figura 26 A-E) é possível observar que a aptidão térmica não é um fator limitante ao cultivo da cana-de-açúcar sobre a região estudada para nenhum dos cenários analisados, nem mesmo nos mapas sob a influência do cenário mais pessimista do IPCC (RCP 8.5) (Figuras 26 D-E).

6.3.2 Aptidão Hídrica da Cana-de-Açúcar

6.3.2.1 Plantio em Maio

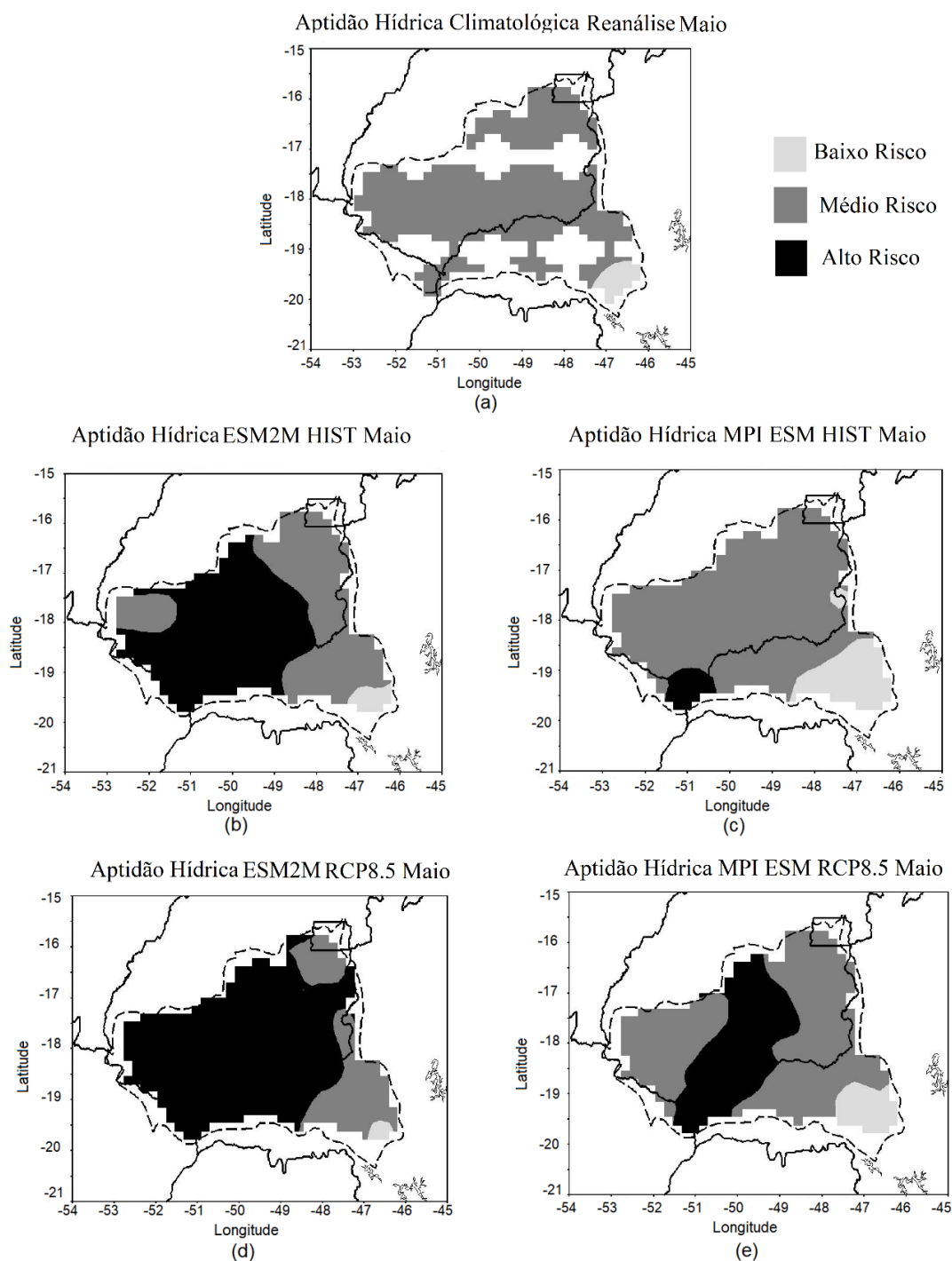


Figura 27: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515), com o plantio em Maio, para três níveis de risco: baixo (em cinza claro), médio (em cinza escuro) e alto (em preto), para os cenários: (A) climatológico com dados advindos da reanálise, (B) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, (C) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM, (D) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M e (E) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM. Fonte: Elaboração própria

No mapa do zoneamento da aptidão hídrica climatológica da cana-de-açúcar (RB867515) para o plantio em maio, é possível averiguar que em quase toda a região da bacia é necessário o uso da irrigação de salvamento, com exceção do extremo sudeste da bacia (Figura 27 A).

No mapa do cenário histórico sobre a influência dos dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em maio (Figura 27 B), é possível observar que a única região da bacia que apresenta baixo risco ao cultivo da cana é uma pequena área da região sudeste da bacia. Já a região central e oeste da bacia são consideradas zonas de alto risco ao cultivo da cana, excetuando-se uma pequena área no oeste da bacia que, em conjunto com áreas da região leste da bacia apresentam um médio risco ao cultivo da cana.

Já no mapa do cenário histórico sobre a influência dos dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, (Figura 27 C), quase toda a região da bacia possui médio risco ao cultivo da cana de açúcar, com exceção de uma pequena área ao sudoeste da bacia, a qual apresenta alto risco ao cultivo, e a região sudeste da bacia que apresenta baixo risco ao cultivo da cana.

No mapa do cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 sobre a influência dos dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, (Figura 27 D), há o aumento da área de alto risco ao cultivo da cana, tanto sobre a pequena área da região oeste quanto sobre áreas da região leste, quando comparado ao mapa da (Figura 27 B). Continua sendo observado uma área de médio risco sobre as regiões sudeste e nordeste, e uma área de baixo risco sobre a região sudeste.

De forma geral, o zoneamento da aptidão hídrica da cana soca (RB867515) para o plantio em maio, apresenta como área apta ao cultivo em todos os cenários pertencentes à Figura (27) a região sudeste da bacia. Outro fator relevante dá-se pelo aumento da área de inaptidão no cenário de mudanças climáticas sobre a influência dos dois modelos. Além disso, é interessante observar que mesmo sob a influência do cenário mais pessimista fornecido pelo IPCC (RCP 8.5), o mapa do cenário de mudanças climáticas sob a influência dos dados do modelo MPI ESM ainda apresenta menor área de inaptidão do que o mapa do cenário histórico sob a influência do modelo ESM2M.

Com isto, é possível evidenciar que para o plantio realizado em maio os resultados sob a influência do modelo ESM2M são mais pessimistas do que os mapas sob a influência do modelo MPI ESM, e que mesmo em vista do pior cenário e do modelo que

influencia de forma mais pessimista a região sudeste da bacia continua apresentando baixo risco à produção.

6.3.2.2 Plantio em Agosto

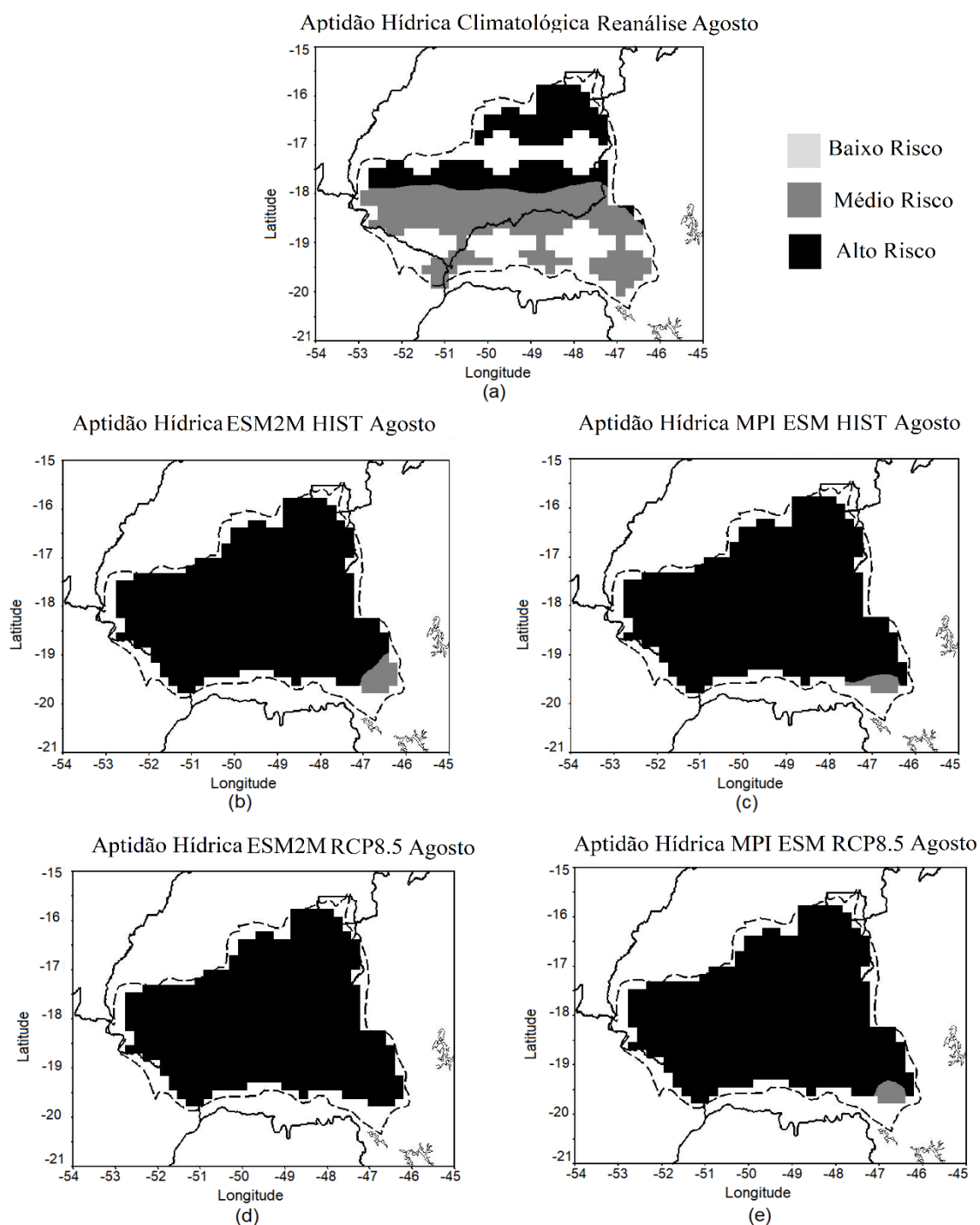


Figura 28: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515) com o plantio em Agosto, para três níveis de risco: baixo (em cinza claro), médio (em cinza escuro) e alto (em preto), para os cenários: (A) climatológico com dados advindos da reanálise, (B) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, (C) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM, (D) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M e (E) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM. Fonte: Elaboração própria

No mapa do zoneamento da aptidão hídrica climatológica da cana-de-açúcar (RB867515) para o plantio em agosto, observa-se que a região norte da bacia apresenta alto risco ao cultivo da cana e a região sul médio risco (Figura 28 A).

No mapa do cenário histórico sobre a influência dos dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, para o plantio em maio Figura (28 B), observa-se que grande parte da bacia é considerada de alto risco ao cultivo da cana, excluindo-se uma área da região sudeste da bacia, onde é observado médio risco ao cultivo da cana.

Já no mapa do cenário histórico sobre a influência dos dados de entrada os dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI ESM, Figura (28 C), uma região ainda maior do que a do mapa da Figura (28 B) tem alto risco ao cultivo, apenas uma pequena área no sudeste da bacia possui médio risco ao cultivo.

No mapa do cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 sobre a influência dos dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, Figura (28 D), toda a bacia tem alto risco ao cultivo da cana soca (RB867515).

Para o mapa do cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 sobre a influência dos dados do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, Figura (28 E), quase toda a bacia tem alto risco ao cultivo da cana soca (RB867515), somente uma diminuta área ao sudeste da bacia tem médio risco ao plantio.

De forma geral, o zoneamento da aptidão hídrica da cana soca (RB867515) para o plantio em agosto, apresenta como área apta ao cultivo em quase todos os cenários pertencentes à Figura (28) a região sudeste da bacia. Outro fator relevante dá-se de que para o plantio em agosto a maior parte da bacia é considerada inapta ao cultivo na maioria dos cenários, somente o cenário climatológico apresenta um cenário em que há aptidão com restrição para o sul da bacia.

6.3.2.2 Plantio em Novembro

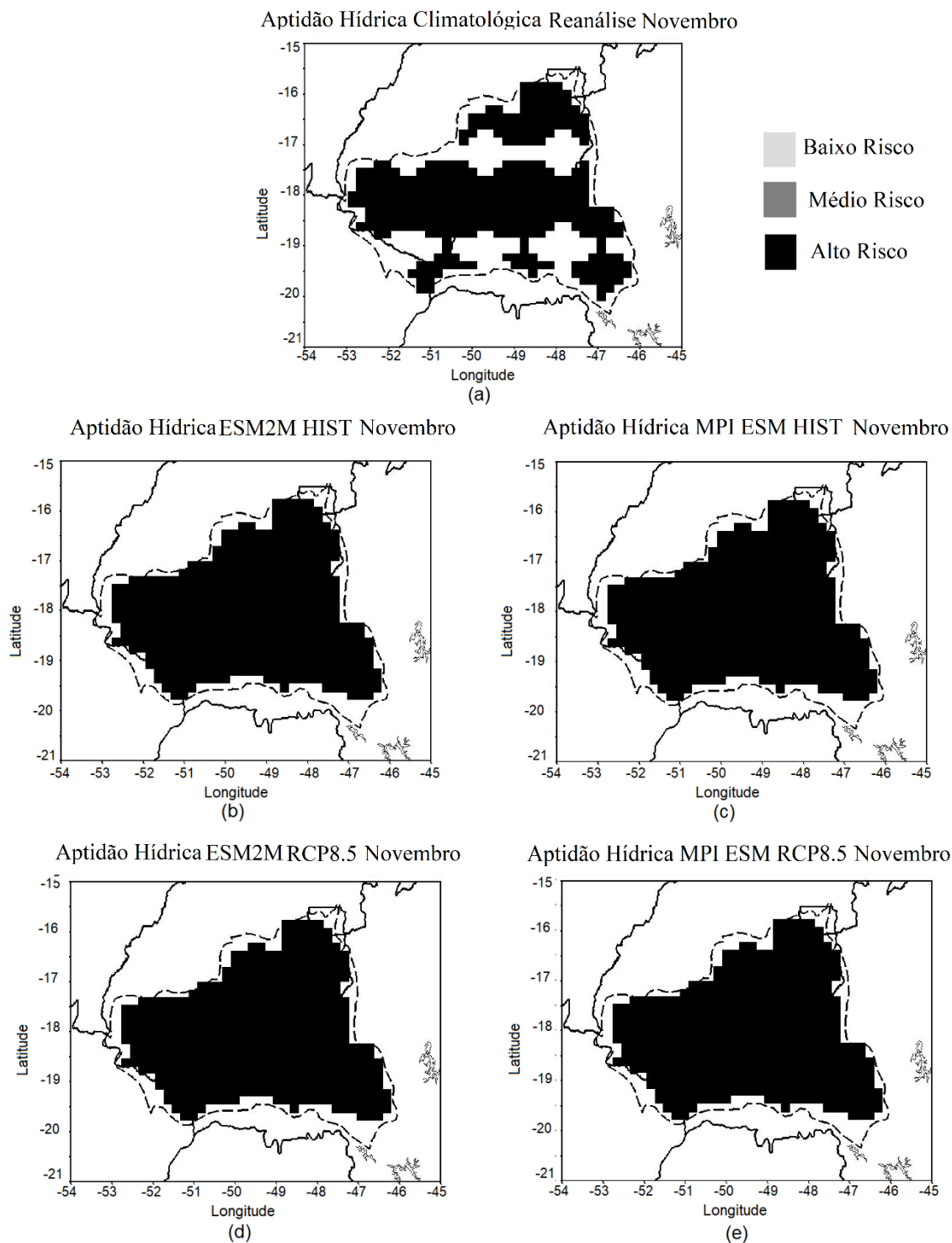


Figura 29: Mapa do zoneamento da aptidão térmica da cana soca (RB867515) com o plantio em Novembro, para três níveis de risco: baixo (em cinza claro), médio (em cinza escuro) e alto (em preto), para os cenários: (A) climatológico com dados advindos da reanálise, (B) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M, (C) histórico com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM, (D) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo ESM2M e (E) de mudanças climáticas RCP8.5 com dados advindos do modelo RegCM4 forçado pelo modelo MPI-ESM. Fonte: Elaboração própria

Para o caso do plantio em novembro, independentemente do cenário analisado houve a inaptidão da necessidade hídrica ao cultivo da cana soca (RB867515) em toda a região da bacia, como mostrado nas (Figuras 29 A-E).

6.4 Discussão dos Resultados

Através da análise dos mapas de aptidão térmica (Figura 26 A-E) foi possível constatar que a temperatura não é um fator limitante ao cultivo da cana de açúcar em nenhum dos cenários estudados, nem mesmo no cenário mais pessimista do IPCC (RCP 8.5).

Segundo VAN DILLEWIJN (1952), a temperatura diária ótima para a germinação está entre 26 e 32 ($^{\circ}\text{C}$). Já nos estádios fenológicos do perfilhamento e do crescimento essa temperatura diária ótima é em torno de 30 ($^{\circ}\text{C}$).

Assim, como mostrado anteriormente, o aumento da temperatura pode proporcionar o efeito contrário à inaptidão, pois com este incremento a variável da temperatura tende a ficar mais próxima da temperatura considerada ótima para o cultivo.

No que concerne a aptidão hídrica, as datas de plantio que apresentam as zonas com os menores riscos, na ordem de maior aptidão hídrica, são maio e agosto (Figuras 27 e 28).

Entretanto, quando é considerada a análise da produtividade (Figuras 23; 24; 25) e os valores da necessidade hídrica (Figuras 20; 21; 22) do cultivo da cana, o zoneamento passa a ter um outro enfoque, pois como mencionado por diversos autores, *e.g.* BARNES (1964); VAN DILLEWIJN (1952); INMAN-BAMBER & SMITH (2005), a distribuição da precipitação ao longo do ciclo da cana é extremamente importante, devido ao fato de que há estádios fenológicos com maior susceptibilidade ao déficit hídrico e outros em que a cana possui maior resiliência.

Segundo ROBERTSON *et al.* (1999) *apud* INMAN-BAMBER & SMITH (2005), a cana de açúcar possui resiliência ao déficit hídrico nos estádios iniciais. Porém, durante o estágio de perfilhamento e todo o estágio de crescimento do colmo o déficit hídrico mostra-se prejudicial ao cultivo (BEZUIDENHOUT *et al.*, 2003; RAMESH & MAHADEVASWAMY, 2000). No estágio de maturação, os períodos de seca ocasionam o aumento do acúmulo de sacarose, contudo pode haver a diminuição da produtividade de biomassa (INMAN-BAMBER & JAGER (2004) *apud* INMAN-BAMBER & SMITH (2005)).

Em consideração à explanação anterior sobre a susceptibilidade da cana ao déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos, foi possível observar que apesar de maio apresentar um menor déficit hídrico (mm/safra) (Figura 19 A-E), ainda assim não apresentou, nem em termos de abrangência nem em termos de valor, a maior produtividade da cana (t/ha) (Figura 23 A-E) quando comparada às outras datas de plantio. A produtividade foi superior espacialmente em termos de valor em agosto (Figura 24 A-E), seguido por novembro (Figura 25 A-E).

Sabendo do regime pluviométrico da região, apresentado no item 5.1, tais resultados corroboram as conclusões encontradas por RAMESH & MAHADEVASWAMY (2000); BEZUIDENHOUT *et al.* (2003). Isso é porque os estádios fenológicos de maior susceptibilidade ao déficit hídrico ocorrem nos períodos mais secos, para o cenário do plantio em maio.

Já o período de maior resiliência ao déficit hídrico favorece o plantio em agosto, corroborando os resultados encontrados por ROBERTSON *et al.* (1999) *apud* INMAN-BAMBER & SMITH (2005).

Em novembro, parte do estágio fenológico de menor resistência ao déficit hídrico ocorre exatamente sobre épocas de menor disponibilidade hídrica, ocasionando assim uma menor produtividade quando comparado a agosto.

Desse modo, considerando tudo o que foi exposto neste item, é possível selecionar as datas de plantio com o menor risco do zoneamento de aptidão hídrica e melhor desempenho da produtividade da cana, não apenas maio, mas também agosto.

Em relação à localização que apresentou o menor risco de aptidão do ZAPAC (Figuras 20; 21; 22), pode-se concluir que ela está localizada na região sudeste da bacia. Contudo, no momento em que consideramos juntamente a análise da produtividade, a região oeste da bacia também passa a ser considerada. Esses resultados voltados para a localização vão de acordo com os resultados encontrados por SCARPARE *et al.* (2016), para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Além desses autores, a região sudoeste da bacia foi prevista como área de expansão da cana-de-açúcar nos trabalhos de FACHINELLI & PEREIRA (2017); TAYT-SOHN *et al.* (2018).

6.4.1 Avaliação do ZAPAC e Escolha das Zonas para a Expansão da Cana-de-Açúcar

O mapa de uso do solo mostra que a zona de menor risco de aptidão hídrica, no sudeste da bacia, possui áreas de cultivo agrícola (aproximadamente 4.5 bilhões (m²) ou 450 mil (ha)), com áreas de pastagem (aproximadamente 2.7 bilhões (m²) ou 270 mil (ha)) e muitas áreas prioritárias de conservação da biodiversidade.

Já a zona considerada com o melhor desempenho da produtividade da cana, região oeste, é observado que o uso do solo predominante da região é a pastagem com cerca de 24 bilhões (m²) ou 2.4 milhões (ha).

Tendo em vista a projeção para 2026 do PDE (EPE, 2017), a qual indica que a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar em todo Brasil será de 8 bilhões de metros quadrados ou 0.8 milhões de hectares, e de que segundo GALDINO *et al.* (2016); FERNANDES *et al.* (2018); STRASSBURG *et al.* (2014), cerca de 5 milhões (ha) de áreas de pastagem com algum nível de degradação são encontradas em Goiás, e 4,6 milhões (ha) desse mesmo tipo de área são encontradas em Minas Gerais, incluindo áreas sobre a região sudeste da bacia. É possível averiguar que apenas a região sudeste da bacia não seria capaz de absorver toda a área projetada para a expansão da cana.

Tal situação ocorre, pois, apesar da região sudeste da bacia deter áreas de pastagem degradada que poderiam ser realocadas para áreas onde a pastagem possui maior eficiência de produção, a extensão total da área de pastagem na região sudeste da bacia representa aproximadamente 34 % da área necessária para a expansão da cana projetada pelo PDE.

Contudo, pode-se considerar também áreas da região oeste da bacia, principalmente sobre regiões à sudoeste da bacia (com exceção da área entre as latitudes 19°75'S e 19°00'S e as longitudes 51°50'O e 50°50'O), pois mesmo em face de um déficit hídrico grande nas diferentes datas de plantio (Figuras 20; 21; 22), ainda assim essa região obteve altos valores de produtividade da cana (Figuras 23, 24, 25), sendo que esta região possui 980 mil (ha) de áreas de pastagem.

Caso as áreas sob o domínio sudoeste da bacia venham a ser utilizadas, as áreas de pastagem poderiam ser realocadas para regiões de pastagem degradada, e toda a expansão prevista para 2026 poderia ocorrer sobre esta região sem empecilhos de cunho da abrangência territorial, uma vez que o total de área de pastagem da região sudoeste é

maior que o total de área projetada para a expansão da cana-de-açúcar até 2026 para todo o Brasil.

Essa realocação, no caso das duas áreas recomendadas (sudeste da bacia e sudoeste da bacia), poderia ocorrer inclusive dentro dos estados de Goiás e Minas Gerais, pois as duas regiões possuem juntas mais de 9 milhões (ha) de pastagem com algum nível de degradação, as quais se recuperadas seriam capazes de absorver todo o rebanho realocado dessas duas regiões que seriam utilizadas para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, como mostrado por MARTHA *et al.* (2012).

Tal diagnóstico de realocação do rebanho para o cultivo da cana está em observância com as averiguações feitas por STRASSBURG *et al.* (2014); TAYT-SOHN *et al.* (2018); BELLEZONNI *et al.* (2018); CAI *et al.* (2010).

Vale ressaltar, que essa realocação pode ainda contar com a ajuda do Plano ABC (MAPA, 2018), no qual áreas de pastagem degradada estão sendo recuperadas através de incentivos fornecidos pelo governo federal.

Desse modo, com a mudança do rebanho para áreas recuperadas de pastagem degradada haveria terra suficiente para o cultivo da cana-de-açúcar e para a pecuária, ocasionando assim um menor impacto ao meio ambiente e à segurança alimentar.

6.5 Comparação da Tese com os Resultados de TAYT-SOHN *et al.* (2018)

No trabalho feito por TAYT-SOHN *et al.* (2018) (Figuras 12 a-e), é possível observar que o mapa de aptidão hídrica do cenário RCP 8.5, pertencente ao modelo ESM2M (Figura 12 e), apresenta o mesmo nível de risco (alto), sobre toda a bacia, do apresentado neste trabalho sobre a influência do mesmo cenário e modelo para o plantio em novembro (Figura 29 E).

É relevante notar que os novos parâmetros utilizados na formulação do zoneamento possuem resoluções diferentes, logo, na análise da (Figura 29 E), em observância com o zoneamento de aptidão hídrica, os mapas de zoneamento da tese apresentaram maior detalhamento da bacia, incluindo áreas que outrora não haviam sido verificadas devido à resolução dos dados de entrada anteriores. Apesar disto, o zoneamento continuou apresentado o mesmo nível de risco sobre a bacia, para uma mesma estação do ano.

Nesta tese foi observado que a temperatura não é um fator limitante ao cultivo da cana na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, TAYT-SOHN *et al.* (2018) também chegou a mesma conclusão.

Mas cabe destacar que, com a metodologia aplicada nesta tese, a qual usou diferentes datas de plantio e também mapas da produtividade da cana, foi possível recomendar zonas que não haviam sido consideradas por TAYT-SOHN *et al.* (2018), como por exemplo, as zonas que demonstraram alto requerimento hídrico em agosto, porém apresentaram também alta produtividade. Inclusive, aumentando a área recomendada ao plantio. Assim, os resultados da tese trouxeram maior detalhamento do ponto de vista territorial, de manejo e de cultivo, sendo este último relacionado à interação de um cultivar específico ao regime pluviométrico.

Além disso, devido à nova equação de evapotranspiração modificada inserida no modelo DSSAT-CSM, os mapas de produtividade, de necessidade hídrica, do zoneamento da aptidão hídrica, bem como a avaliação de todos os mapas do zoneamento apresentaram menor incerteza, para o caso do cenário climatológico, apresentando com isso uma análise mais consubstanciada do zoneamento.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSÕES

Os índices aplicados às equações de Priestley-Taylor modificada e FAO 56-Penamn-Monteith, versus os valores observados, dentro e fora do modelo DSSAT-CSM, mostraram que a equação modificada nessa tese apresentou desempenho superior à equação de FAO56-Penman-Monteith. Alguns índices são cerca de 10% maiores, como por exemplo, no experimento 1, como mostrado nas (Tabelas 3 e 5). Outro aspecto interessante é o fato de que quando a análise estatística leva em consideração os dados de maior qualidade, como mencionado por SANTIAGO (2001), as diferenças entre Priestley-Taylor modificada e FAO56-Penman-Monteith são ainda maiores, como mostrado na (Tabela 4).

Houve, ainda, impacto da equação de evapotranspiração modificada nas simulações de produtividade. Esse impacto pode ser observado para o caso da Usina DECAL em termos de diminuição do erro, chegando a apresentar uma melhora de cerca de 5% na MAPE. Enquanto que a usina Serranópolis, quase todos os resultados apresentaram um melhor desempenho em Priestley-Taylor modificada, com exceção do índice de Willmott.

A modificação realizada na equação de evapotranspiração de PRIESTLEY & TAYLOR (1972) (Priestley-Taylor modificada) foi adicionada à modelagem de sistemas agrícolas (DSSAT/CANEGRO) para a formulação do zoneamento. Provando-se, assim, capaz de reduzir as incertezas tanto do ponto de vista do próprio resultado da simulação em relação à evapotranspiração (mm/dia) quanto do ponto de vista do resultado final da modelagem, que é a produtividade da safra (t/ha), contribuindo de forma substancial para a formulação de um zoneamento agroclimático de menor incerteza.

Os mapas da necessidade hídrica da cana-de-açúcar mostram áreas de alta demanda hídrica em todos os cenários analisados, principalmente sobre a região central da bacia. As datas de plantio que se mostraram favoráveis ao cultivo da cana em termos de necessidade hídrica são maio e agosto. A região com menores valores de necessidade hídrica em todos os cenários é a região sudeste da bacia.

O zoneamento da aptidão hídrica da cana soca mostra que a região de menor risco ao cultivo da cana na bacia é a região sudeste, e a data de colheita no mês de maio. Porém, quando utilizados os mapas de produtividade na avaliação do ZAPAC, esses

mapas apresentaram um segundo ponto de vista sobre o zoneamento da aptidão hídrica, no qual é avaliado, também, a resiliência da cana frente aos períodos de seca e o seu impacto na produtividade.

Com base nessa informação, a região sudoeste da bacia, passa a ser considerada na formulação da estratégia das zonas de expansão da cana-de-açúcar, mas, não somente isso, como também o mês de agosto passa a ser considerado. Uma vez que a região oeste da bacia no mês de agosto, mesmo sobre a situação de alto déficit apresentou bom desempenho de produtividade.

Com base mapa de uso do solo, é possível constatar que as regiões recomendadas à expansão da cana pelo ZAPAC, apresentam, na maior parte do seu território conjunto, áreas de pastagem.

Juntas, as duas áreas recomendadas, sudoeste e sudeste da bacia possuem mais de 1 milhão (ha) de pastagem. O que, seria o suficiente para que toda a área projetada de expansão da cana-de-açúcar até 2026, 0.8 milhões (ha), ocorra sobre a bacia. Uma vez que, as áreas de pastagem poderiam ser realocadas para áreas de pastagem degradada. Incluindo as áreas de pastagem dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio Paranaíba; e considerando que as áreas de pastagem em algum nível de degradação só nos estados de Goiás e Minas Gerais representam mais de 9 milhões (ha) com cerca 30% de eficiência, seria possível realocar os rebanhos dentro dessas. Minorando, desse modo, os impactos ambientais, pois o rebanho pode ser realocado por completo para regiões de pastagem degradada, auxiliando assim na segurança alimentar, como observado por STRASSBURG *et al.* (2014); TAYT-SOHN *et al.* (2018); BELLEZONNI *et al.* (2018); CAI *et al.* (2010).

Outro aspecto interessante da troca de pastagem por cana-de-açúcar na região do Cerrado foi observado por LOARIE *et al.* (2011), em que foi concluído que a troca de pastagem por cana-de-açúcar possui um efeito de resfriamento.

Sobre a região sudoeste da bacia, a irrigação de alta demanda é recomendada, porém segundo FACHINELLI & PEREIRA (2017), tal região possui alta disponibilidade hídrica o que não acarretaria em riscos para a segurança hídrica, caso a expansão do cultivo da cana-de-açúcar ocorra sobre a região.

Assim sendo, os meses de plantio recomendados são maio e agosto. Para o caso das regiões onde deve ocorrer a expansão, foram selecionadas a região sudoeste (com exceção da área entre as latitudes 19°75'S e 19°00'S e as longitudes 51°50'O e 50°50'O) e sudeste da bacia, pois estas regiões impactam em menor escala o meio ambiente, não

acometendo áreas de proteção ambiental e atendendo ,assim, a um quesito da segurança ambiental; não sobrecarrega a bacia em termos de demanda hídrica para o cultivo da cana, como mostrado por FACHINELLI & PEREIRA (2017), e com a realocação dos rebanhos para áreas de pastagem degradadas atende também a um quesito da segurança alimentar.

Isto posto, caso toda a expansão da área cultivada com cana-de-açúcar ocorra dentro da bacia, tem-se que a estratégia mais recomendada como primeiro passo é a da utilização de toda a área de pastagem da região sudeste (34%) e que o restante da expansão (66%) seja nas áreas de pastagem da região sudoeste da bacia. A estratégia foi traçada desta forma, pois região sudeste apresenta uma menor necessidade hídrica ao cultivo da cana, mas sozinha não é capaz de suportar toda a expansão em termos de área de pastagem, necessitando, desse modo, do suporte dado pela região sudoeste da bacia. Essa última região, apesar da alta necessidade hídrica ao cultivo da cana, apresenta alta disponibilidade hídrica e também alta produtividade da cana-de-açúcar mesmo em um cenário deficitário.

No que se refere aos resultados do zoneamento aplicado nesta tese e do zoneamento efetuado por TAYT-SOHN *et al.* (2018), concluiu-se que o zoneamento agroclimático na tese possui maior detalhamento nas informações, uma menor incerteza atrelada aos mapas da climatologia da produtividade e da necessidade hídrica e que para a mesma estação do ano estudada tanto no artigo de TAYT-SOHN *et al.* (2018), quanto na tese, não foram observadas modificações significativas em termos de nível do risco do zoneamento, continuando a bacia a ser considerada de alto risco. Apesar de que, áreas que não haviam sido avaliadas em TAYT-SOHN *et al.* (2018), passaram a ser avaliadas na tese devido à melhor resolução utilizada.

Em termos metodológicos, a tese acrescentou informações relevantes relacionadas à data de plantio, e mostrou regiões que no artigo de TAYT-SOHN *et al.* (2018), em nenhum dos cenários estudados, era considerada como apta.

Além disso, nos resultados da tese, a região considerada como de alto risco em termos de déficit hídrico passou a ser considerada devido à análise de produtividade e da resiliência ao déficit hídrico apresentado pela cana. Já no artigo, os autores previram tal região como apta com restrição apresentando nível médio de risco.

Em suma, concluiu-se que os resultados da tese apresentaram maior detalhamento em termos de manejo, de datas de plantio, da abrangência territorial do zoneamento e de

especificidades da cultura da cana, mostrando que o zoneamento foi sensível as diferenças metodológicas aplicadas na tese como um todo.

7.1 Limitações do Trabalho e Sugestões de Trabalhos Futuros

A análise do ZAPAC se baseou no ZAE-CANA, o qual utiliza como variável de aptidão térmica a temperatura média anual, como um limite inferior do zoneamento da aptidão térmica e com isso impossibilita uma análise mais detalhada da aptidão térmica da cana-de-açúcar na base diária, o que segundo VAN DILLEWIJN (1952), seria relevante uma vez que temperaturas diárias acima de 40 ($^{\circ}\text{C}$) podem ser prejudiciais ao cultivo da cana.

Dessa maneira, é sugerida, para trabalhos futuros, a utilização das faixas de temperatura cardinais da cana-de-açúcar em frequência diária para cada estágio fenológico.

Além disso, os dados históricos e de mudanças climáticas advindos da modelagem não tinham o período completo de 30 anos de dados e, por conta disto, sugere-se para trabalhos futuros que seja empregada a técnica de imputação de dados para formular uma climatologia considerada completa pela OMM.

Quanto maior o número de cenários gerados tanto em termos de modelos globais que forcem os modelos climáticos regionais, quanto em termos de cenários do IPCC, mais consistente fica a análise estratégica da expansão da cana, sendo desse modo recomendado para trabalhos futuros um número maior de cenários para a análise.

A análise do comportamento da evapotranspiração seria ainda mais realista se fosse feito sobre a bacia estudada. Assim, é recomendado aos trabalhos futuros que utilizem experimentos de lisímetro sobre a região estudada.

Para o cenário histórico, dada as próprias condições encontradas em termos de período estudado, frequência dos dados, resolução dos dados e disponibilidade de variáveis, fizeram com que ocorressem restrições aos dados que seriam utilizados para o cenário climatológico, sendo utilizados produtos da Reanálise 1. Tal reanálise possui baixa resolução, sendo assim, recomendado uma análise com um segundo período climatológico e um outro produto de reanálise de melhor resolução ou até mesmo dados meteorológicos.

Uma outra recomendação é o a utilização do modelo SEBAL para a estimativa de evapotranspiração, com a possível espacialização desta variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABTEW, W. *Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south florida*. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 32, n. 3, p. 465-473, 1996.
- ACOCK, B.; REDDY, V.R.; WHISLER, F.D.; BAKER, D.N.; McKINION, J.M.; HODGES, H.F.; BOOTE, K.F. *The soybean crop simulator GLYCIM: model documentation*. Washington: USDA, 1985.
- AGGARWAL, P. K. *et al.*, “*InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description.*” **Agricultural systems**, v. 89, n. 1, p. 1-25, 2006.
- AGOSHKOV, V. I. “*Mathematical models of life support systems*”. In **Knowledge for Sustainable Development, An Insight into the Encyclopaedia of Life Support Systems**, v. 1, p. 335-281, 2002.
- AHMADI, S. H.; FOOLADMAND, H. R. “*Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran*”. **Irrigation Science**, v. 26, n. 4, p. 303-312, 2008.
- ALEXANDER, A. G *et al.* “*Sugarcane physiology, a comprehensive study of the Saccharum source-to-sink system*”. **Elsevier Scientific Publishing Co.**, Amsterdam, The Netherlands, 1973.
- ALKAEED, O. FLORES C., JINNO, K.; TSUTSUMI, A. “*Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka*”, Japan. **Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University**, v. 66, n. 1, p. 1-14, 2006.
- ALLEN, R. G. “*A Penman for all seasons*”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.
- ALLEN, R. G. JENSEN, M. E., WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. “*Operational estimates of reference evapotranspiration*”. **Agronomy journal**, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.
- ALLEN, R. G. *et al.*, “*Water Requirements*”. In: **Design and Operation of Farm Irrigation Systems, 2nd Edition**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 208-288, 2007.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. “*FAO Irrigation and drainage paper No. 56.*” **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- ALLEN, R.G., SMITH, M., PERRIER, A., AND PEREIRA, L.S. “*An update for the definition of reference evapotranspiration*”. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S., HOWELL, T. A., & JENSEN, M. E. “*Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy*. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011.

ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. “Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, 2013.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES J.L.; SPAROVEK, G. “Köppen’s climate classification map for Brazil”, **Meteorol. Zeitschrift**. V.22 p. 711-728, 2013.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, Brasília, 312 p. ISBN: 978-85-8210-020-2 1, 2013.

ANA, Agência Nacional de Águas, Metadados, 2015, disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acessado em: 15 de junho de 2015.

ANA, Agência Nacional de Águas, Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016. Disponível em: <<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>>. Acessado em: 10 de junho de 2017

ANA – Agência Nacional de Águas, GeoNetwork metadados. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home> >. Acessado em : 05/04/2018.

ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. “Evapotranspiration-How good is the Bowen ratio method?” In: **Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology**. Elsevier, p. 133-150, 1984.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em: <<http://spdistribuidora.com/administrador/docs/manual/20.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RESOLUÇÃO ANP Nº 19, DE 15.4.2015 - DOU 16.4.2015**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>>. Acesso em: 15 out. 2017.

APSIM - AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEM SIMULATOR. THE APSIM SOILWAT MODULE. Disponível em: <aprunet.apsim.info/svn/apsim/tags/Apsim73/Documentation/4%20Module%20Reference/SoilWat.htm>. Acesso em: 5 out. 2016.

ARMSTRONG, J.S. “Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners.” Boston, **Kluwer Academic Publishers**, 2001

ARYA, S. P., “Introduction to Micrometeorology”. San Diego: Academic Press, International Geophysics; v.79, p. 420, 2001.

ASSAD, E. D. et al., “Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento”. **Informe Agropecuário**, v. 29, p. 47-60, 2008.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S.; SILVA, S. C.; LOBATO, E. J. V. “Uso de modelos numéricos de terreno na espacialização de épocas de plantio”. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistema de Informações Geográficas: aplicações na agricultura**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, cap.10, p.231-248, 1993.

- ASSAD, E. D. *et al.*, “Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.
- AUDE, M. I. S. “Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade”. **Ciência rural**, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.
- BAIER, W.; ROBERTSON, G. W. “Estimation of latent evaporation from simple weather observations”. **Can. J. Plant Sci.** v. 45, p. 276–284, 1965.
- BALKOVIČ, J. *et al.*, “Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation”. **Agricultural Systems**, v. 120, p. 61-75, 2013.
- BANNAYAN, M.; CROUT, N. M. J.; HOOGENBOOM, G. “Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom”. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 1, p. 114-125, 2003.
- BARROS, V. R. SOUZA, A. P. D., FONSECA, D. C., & DA SILVA, L. B. “Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos”. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, 2009.
- BARROWS, R.; NEUMAN, M. “A review of experience with land zoning”. **Land Tenure Center mimeo**, 1990.
- BARTON, I. J., “A Parameterization of the Evaporation from Nonsaturated Surfaces”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, p. 43-47, 1979.
- BASSU, S. *et al.*, How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?. **Global change biology**, v. 20, n. 7, p. 2301-2320, 2014.
- BEGUERÍA, SANTIAGO; VICENTE-SERRANO, S. M.; ANGULO-ARTÍNEZ, M. “A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 10, p. 1351-1356, 2010.
- BENLI, B. *et al.*, “Assessment of winter wheat production under early sowing with supplemental irrigation in a cold highland environment using CropSyst simulation model”. **Agricultural Water Management**, v. 93, n. 1-2, p. 45-53, 2007
- BLAD, B. L.; ROSENBERG, N. J. “Lysimetric calibration of the Bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the central Great Plains”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 13, n. 2, p. 227-236, 1974.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. “Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data.” Washington:USDA Soil Conservation Service, Technical Paper n. 96, p. 48, 1950.
- BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. “Noções fitotécnicas”. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V. (Org.). **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livroceres. 2006. V.1, p. 80-91.
- BELLEZONI, R. A.; SHARMA, D.; VILLELA, A. A.; PEREIRA JUNIOR, A. O. “Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix”. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, n. July 2017, p. 108–119, 2018.

- BERNARDES L. M. C., “Os tipos de clima do Brasil”. **Bol. Geogr**, v. 9, p. 988-997, 1951.
- BEVEN, K. “A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates”. **Journal of Hydrology**, v. 44, n. 3-4, p. 169-190, 1979.
- BEZLEPKINA, I. *et al.*, “Using the SEAMLESS integrated framework for ex-ante assessment of trade policies. In capítulo 13, **Towards effective food chains: models and applications**. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands, p. 251-271, 2010.
- BINSWANGER, H. P.; DEININGER, K.; FEDER, G. “Power, distortions, revolt and reform in agricultural land relations”. **Handbook of development economics**, v. 3, p. 2659-2772, 1995.
- BISHNOI, O. P. “Agroclimatic Zoning”. **Report CAGM (No. 30)**. P. 154, 1989.
- BRISSON, N. *et al.*, “An overview of the crop model STICS”. **European Journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 309-332, 2003.
- BROWN, L. G., JONES, J. W., HESKETH, J. D., HARTSOG, J. D., WHISLER, F. D.; HARRIS, F. S. “COTCROP: computer simulation of growth and yield”. **Information Bulletin No. 69**. Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station. Mississippi State, USA, 1985.
- BRYANT, K. J. *et al.*, “Simulating corn yield response to irrigation timings: Validation of the EPIC model”. **Journal of Production Agriculture**, v. 5, n. 2, p. 237-242, 1992.
- BÖHM, U. KÜCKEN, M., AHRENS, W., BLOCK, A., HAUFFE, D., KEULER, K., ROCKEL, B.; WILL, A. “CLM—the climate version of LM: brief description and long-term applications”. **COSMO newsletter**, v. 6, p. 225-235, 2006.
- BONFANTE, A.; BASILE, A.; ACUTIS, M.; DE MASCELLIS, R.; MANNA, P.; PEREGO, A.; TERRIBILE, F. “SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy”. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 7, p. 1051-1062, 2010.
- BOOGAARD, H. L. VAN DIEPEN, C. A., ROTTER, R. P., CABRERA, J. M. C. A., & VAN LAAR, H. H. **WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5**. SC-DLO, 1998.
- BOOGAARD, H. *et al.*, “A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union”. **Field Crops Research**, v. 143, p. 130-142, 2013.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. “Potential uses and limitations of crop models”. **Agronomy journal**, v. 88, n. 5, p. 704-716, 1996.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W. “The role of crop systems simulation in agriculture and environment”. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)**, v. 1, n. 1, p. 41-54, 2010.
- BOURAIMA, A.-K.; ZHANG, W.; WEI, C. “Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin”. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 58-64, 2015.
- BOWEN, I.S. “The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from Any Water Surface”. **Physical Review**, v. 27, p. 779-787, 1926.

- BRATLEY, P.; FOX, B. L.; SCHRAGE, L. E. **A guide to simulation**. Springer Science & Business Media, 2011.
- BRUNINI, O. *et al.* “Aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo”. **Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil**, 2008.
- BRUNINI, O. *et al.* “Agroclimatic zoning and climatic risks for sugarcane in Mexico: A preliminary study considering climate change scenarios”. In: **Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.** 2010. p. 302-314.
- BRUTSAERT, W. “Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications”. **Reidel**, London, p. 299 1982.
- BYRT, C. S.; GROF, C. P. L.; FURBANK, R. T. “C4 Plants as biofuel feedstocks: optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective free access”. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 53, n. 2, p. 120-135, 2011.
- CABRAL, D. C. “Na Presença da Floresta, Mata Atlântica e História Colonial”. Rio de Janeiro: Garamond/FAPERJ, 536pp, 2014.
- CAI, X.; ZHANG, X.; WANG, D.. “Land availability for biofuel production”. **Environmental science & technology**, v. 45, n. 1, p. 334-339, 2010.
- CAMARGO, A.P.; ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S.; CHIARINI, J.V. “Zoneamento da aptidão climática para culturas comerciais em zonas de cerrado”. In: **Simpósio sobre o Cerrado**, 6. São Paulo, Ed. da USP, p.89-105, 1977.
- CAMARGO, Â. P.; CAMARGO, M. B. P. “Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial”. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P. C. “Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil”. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- 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.
- CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B. da; FOLEGATTI, M.V.; COSTA, J.R.; CRUZ, F.A. “Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, p.108-116, 2006.
- CARVALHO, D. F. *et al.*, “Instalation, calibration and operation of a weighing lysimeter”. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.
- CAVALCANTE JUNIOR, E. G. DE OLIVEIRA, A. D., ALMEIDA, B. D.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. “Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido nordestino”. **Embrapa Cerrados**, 2011.
- CHAVES, M. M. “Effects of Water Deficits on Carbon Assimilation” **Journal of Experimental Botany**, v. 42, no. 234, p. 1-16, 1992.
- CLAUSIUS, R. “Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen”. **Annalen der Physik**, v. 155, n. 3, p. 368-397, 1850.
- COCK, J. H. “Sugarcane growth and development”. **Sugar Cane International**, p. 5-14, 2001.

COHN, A. S. *et al.*, “Cropping frequency and area response to climate variability can exceed yield response”. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 6, p. 601, 2016.

COLLICCHIO, E. *et al.*, “Implicações das Mudanças do Clima no Zoneamento Agroclimático da Cana-de-açúcar no Estado do Tocantins, Considerando o Modelo GFDL”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1730-1747, 2015.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. PERFIL DO SETOR DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO BRASIL - Edição para a safra 2008-2009. v. 1, p. 58, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_05_15_02_45_perfil_su_croalcoool2012e13.pdf>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, Series Históricas de área plantada, Produtividade e Produção. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acessado em: 10 de janeiro de 2018.

CCGE- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil. 2004. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2004. p. 73.

CDO- *Climate Data Operators*. Disponível em: <http://www.mpimet.mpg.de/cdo>, Acessado em: 23/08/2017

CTC - CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Glossário**. Disponível em: <<https://ri.ctc.com.br/pt/glossario>>. Acesso em: 25 de julho de 2018.

CRONQUIST, A. “*The evolution and classification of flowering plants*”. **New York: [sn]**, 1988.

CRUZ, F.A. “*Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica – RJ*”. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)**, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, p. 79, 2005.

DA CUNHA, G. R. *et al.* “Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil”, *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.400-414, 2001.

DA SILVA, V. J.; CARVALHO, H. D. P., DA SILVA, C. R., DE CAMARGO, R.; FRANCO TEODORO, R. E. “*Performance of different methods of estimating the daily reference evapotranspiration in Uberlandia, MG*”. **Bioscience journal**, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

DEE, D. P. *et al.*, “*The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system*”. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

DEHGHANISANIJ, H.; YAMAMOTO, T.; RASIAH, V. “*Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments*”. **Agricultural water management**, v. 64, n. 2, p. 91-106, 2004.

DEJONGE, K. C.; ASCOUGH II, J. C.; ANDALES, A. A.; HANSEN, N. C.; GARCIA, L. A.; ARABI, M.. “*Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation*”. **Agricultural water management**, v. 115, p. 92-103, 2012.

- DEJONGE, K. C.; THORP, K.R. “Implementing standardized reference evapotranspiration and dual crop coefficient approach in the DSSAT cropping system model”. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 6, p. 1965-1981, 2017.
- DE WILLIGEN, P. “Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models”. In: **Nitrogen Turnover in the Soil-Crop System**. Springer, Dordrecht, 1991. p. 141-149.
- DE WIT, A. *et al.*, “25 years of the WOFOST cropping systems model”. **Agricultural Systems**, v. 168, p. 154-167, 2019.
- D'HONT, A. *et al.* “Characterisation of the double genome structure of modern sugarcane cultivars (*Saccharum spp.*) by molecular cytogenetics”. **Molecular and General Genetics MGG**, v. 250, n. 4, p. 405-413, 1996.
- D'HONT, A.; GLASZMANN, J. C. “Sugarcane genome analysis with molecular markers, a first decade of research”. In: **Proc Int Soc Sugarcane Technol.** 2001. p. 556-559.
- DI STEFANO, C. AND V. FERRO “Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid Mediterranean areas.” **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 68, p. 189-199, 1997.
- DICKINSON, R.E. *et al.*, “A regional climate model for the western United States”. **Climatic Change**, v. 15, n. 3, p. 383-422, 1989.
- DIMES, J. P.; FREEBAIRN, D. M. “Analysis for optimal water use in grain cropping systems of north eastern Australia”. In: **Proceedings of the Seventh Australian Agronomy Conference**. 1993.
- DINGMAN, S. L. “Physical Hydrology”, Prentice Hall, Upper Savage, New Jersey, 1992
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. “Guidelines for predicting crop water requirements”., **Irrigation and Drainage paper N. 24**, ed 1, Roma, FAO, p. 179, 1975.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. “Yield response to water”. **Irrigation and drainage paper N. 33**, p. 257, 1979.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. “Guidelines for predicting crop water requirements”. **Irrigation and Drainage Paper 24**. ed. 2. Roma: FAO, p. 156, 1977.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O., “Crop Water Requirements”. **FAO Irrigation and Drainage Paper 24**, ed. 3, Roma, FAO, p. 178, 1984.
- DOUGLAS, E.M.; BELTRÀN-PRZEKURAT, A.; NIYOGI, D.; PIELKE, R. A.; VOROSMARTY, C. J. “The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation—a mesoscale modeling perspective”. **Glob Planet Change** v. 67, n. (1–2), p.117–128, 2009a.
- DOUGLAS, E. M. A.; JACOBS, J. M.; SUMNER, D. M.; RAY, R. L. “Comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types”. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 3-4, p. 366-376, 2009b.
- DROOGERS, P.; ALLEN, R. G. “Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions”. **Irrigation and drainage systems**, v. 16, n. 1, p. 33-45, 2002.

DSSAT - DECISION SUPPORT SYSTEM FOR AGROMETEOROLOGY. Disponível em: <<http://dssat.net/about>>. Acesso em: 10/10.2015.

DUNNE, J. P. *et al.*, “GFDL’s ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics”. **Journal of Climate**, v. 25, n. 19, p. 6646-6665, 2012.

DVWK. “Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen”. **Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau**, Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238, p. 1–135, 1996.

DYER, A. J. “The turbulent transport of heat and water vapour in an unstable atmosphere”. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 93, n. 398, p. 501-508, 1967.

DYER, A.J. “A review of flux-profile relationships”. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 7, n. 3, p. 363-372, 1974.

DYER, A. J.; HICKS, B. B. “Flux-gradient relationships in the constant flux layer”. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 96, n. 410, p. 715-721, 1970.

EBITA, A. *et al.*, “The Japanese 55-year reanalysis “JRA-55”: an interim report.” **Sola**, v. 7, p. 149-152, 2011.

EBRAYI, K. N. *et al.*, “Simulation of nitrogen dynamics in soil using infocrop model”. **Environmental monitoring and assessment**, v. 131, n. 1-3, p. 451-465, 2007.

ELOBEID, A. & HART, C. “Ethanol Expansion in the Food versus Fuel Debate: How Will Developing Countries Fare?”. **Journal of Agricultural & Food Industrial Organization**, v. 5: Iss. 2, 2007.

EMANUEL, K. A.; ŽIVKOVIĆ-ROTHMAN, M. “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models”. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 56, n. 11, p. 1766-1782, 1999.

EMBRAPA SOLOS, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Solos. “Sistema brasileiro de classificação de solos”. **EMBRAPA Produção de Informação, Brasília**, p. 16, 1999.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. “Plantio da Cana-de-Açúcar”. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html. Acesso em: 30 de março de 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Publicações**. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017

EPE. Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 *Plano Decenal de Energia – 2012-2021*. Rio de Janeiro, 2015.

EHLERINGER, J.; BJÖRKMAN, O. “Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants: dependence on temperature, CO₂, and O₂ concentration”. **Plant Physiology**, v. 59, n. 1, p. 86-90, 1977.

ERSL-Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/.../data.ncep.reanalysis.html>>. Acessado em: 20/03/2017.

FACHINELLI, N. P.; PEREIRA JR, A. O. “*Impacts of sugarcane ethanol production in the Paranaíba basin water resources*”. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 8-16, 2015.

FAGERIA, N.K. “Maximizing crop yields”. New York: Marcel Dekker, 1992. 274p.

FAO – Food and Agriculture Organization of United States, AQUASTAT – FAO’s Information System on Water and Agriculture. Disponível em: <www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm#maps>. Acessado em: 20/05/2018

FAO – Food and Agriculture Organization of United States, FAOSTAT – FAO’s Information System on Food and Agriculture. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. Acessado em: 20/05/2018

FAO – Food and Agriculture Organization of United States. “*Agroecological zoning guidelines*”. **FAO Soils Bulletin 76**. Soil Resources, Management and Conservation Service, Rome, p. 78, 1996.

FEDDEMA, J. J. “*A revised Thornthwaite-type global climate classification*”. **Physical Geography**, v. 26, n. 6, p. 442-466, 2005.

FERNANDES, D. S. HEINEMANN, A. B., PAZ, R.; AMORIM, A. “*Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos*”. **Embrapa Arroz e Feijão**, p. 44, Santo Antônio de Goiás, 2010.

FERNANDES, F. H. Souza *et al.* “*Degradation trends based on MODIS-derived estimates of productivity and water use efficiency: A case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado*”. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, p. 30-40, 2018.

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHAI, M. A. “*Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS*”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 225-250, 2005.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de direito ambiental brasileiro**. 14. ed. rev., ampl. e atual. em face da Rio+20 e do novo “Código” Florestal — São Paulo: Saraiva, p. 922, 2013.

FISCHER, R., & HAGAN, R. “*Plant Water Relations, Irrigation Management and Crop Yield*.” **Experimental Agriculture**, v. 1, n 3, p. 161-177, 1965.

FISHWICK, P. A. **Handbook of dynamic system modeling**. CRC Press, 2007.

FLINT, A. L.; CHILDS, S. W. “*Use of the Priestley-Taylor Evaporation Equation for Soil Water Limited Conditions in a Small Forest Clearcut*”. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 56, p. 247-260, 1991.

FRERE, M.; POPOV, G. F. **Agrometeorological crop monitoring and forecasting**. FAO, 1979.

FREVERT, D. R.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

- FRITSCHEN L. J. “Accuracy of evapotranspiration determinations by the bowen ratio method”. **Hydrological Sciences Journal**, v. 10, n. 2, p. 38-48, 1965. DOI: 10.1080/02626666509493388
- GALDINO, S. *et al.* “Large-scale modeling of soil erosion with *RUSLE* for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures”. **Land degradation & development**, v. 27, n. 3, p. 773-784, 2016.
- GASCHO, G.J. 1985. “Water-sugarcane relationships”. **Sugar Journal**. V. 48, p.11–17.
- GASSMAN, P. W. *et al.*, “Historical development and applications of the *EPIC* and *APEX* models”. In: **2004 ASAE Annual Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2004.
- GAVIN, H.; AGNEW, C. A. “Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland”. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 2, p. 229-246, 2004.
- GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. “Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment”. **Irrigation Science**, v. 25, n. 2, p. 127-140, 2007.
- GILBERT, J. K.; BOULTER, C. J. “Aprendendo ciências através de modelos e modelagem”. **Modelos e educação em ciências**. Rio de Janeiro: Ravil, p. 12-34, 1998.
- GIORGETTA, M. *et al.*, “CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-LR model: The rcp85 experiment, served by ESGF”. **World Data Cent Clim. Doi 10.1594/WDCC/CMIP5.MXELr8**, v. 10, 2012
- GIORGI, F. *et al.*, “Addressing climate information needs at the regional level: the *CORDEX* framework”. **World Meteorological Organization (WMO) Bulletin**, v. 58, n. 3, p. 175, 2009.
- GIORGI, F.; BATES, G.T. “The climatological skill of a regional model over complex terrain”. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 11, p. 2325-2347, 1989.
- GOES, T. *et al.*, “Sugarcane in Brazil Current technologic stage and perspectives”. **Revista de Política Agrícola**, v. 20, n. 1, p. 52-65, 2011.
- GOLDEMBERG, J. “Ethanol for a sustainable energy future”. **Science**. 315, 808–810, 2007.
- GOLDEMBERG, J. *et al.*, “Ethanol learning curve—the Brazilian experience”. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 3, p. 301-304, 2004.
- GOLLAN, T.; PASSIOURA, J.B. & MUNNS, R. “Soil water status affects the stomatal conductance of fully wheat and sunflower leaves. *Australian*”. **Journal of Plant Physiology**, Melbourne, 13:459-464, 1986.
- GOMMES, R. *et al.*, “Guide to Agricultural Meteorological Practices (*GAMP*)”. 2010 Edition (WMO-No. 134) Updated in 2012. 2010.
- GOYAL, M. R. “Evapotranspiration: Meteorological Methods”. In: **Evapotranspiration**. GOYAL, M. R.; HARMSSEN E.W. Apple Academic Press, p. 114-135, 2013.
- GRANGER, R. J. “An examination of the concept of potential evaporation”, **Journal of Hydrology**, v. 111, p. 9–19, 1989.

- GRIVET, L. *et al.* “A review of recent molecular genetics evidence for sugarcane evolution and domestication”. **Ethnobotany Research and Applications**, v. 2, p. 009-017, 2004.
- GRUZINSKI, S.; BERNAND, C. “*História do Novo Mundo 2: As Mestiçagens*” v. 2. EdUSP, 2006.
- GUNSTON, H.; BATCHELOR, C. H. “A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries”. **Agricultural Water Management**, v. 6, n. 1, p. 65-77, 1983.
- GUYOT G. “*Physics of the environment and climate*”. p 632, 1998.
- HA, W. SPRINGER, A. E., O'DONNELL, F. C., KOLB, T. E “*Sensitivity of Evapotranspiration Models to Onsite and Offsite Meteorological Data for a Ponderosa Pine Forest*”. In: **Current Perspective to Predict Actual Evapotranspiration**. InTech, 2017.
- HARGREAVES, G.H., “*Practical agroclimate information systems*”. In: D.F. Cusack (Ed), *Agroclimate Information for Development: Reviving the Green Revolution*. Westview, Boulder, CO, p. 113-127, 1983.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. “*Estimation of potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*”, Nova Iorque, v.108, n.3, p.225-230, 1982.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. “*Reference crop evapotranspiration from temperature*”. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v.1, n.2, p.96-99, 1985.
- HANSEN, S. “*Estimation of Potential and Actual Evapotranspiration*”. **Hydrology Research**, v. 15, n. 4-5, p. 205-212, 1984.
- HAY, L.E.; G.J. MCCABE. “*Spatial Variability in Water Balance Model Performance in the Conterminous United States*”. **Journal of the American Water Resources Association**.v. 38, p. 847-860, 2002.
- HAUDE, W; MOSSE, O. “*Allageneina Betrachtungen U'ber eine formal fur Landwirtschaftliche*”. **Klima Kewertung**, Bioklin,Beibl,v.4, p. 54-62, 1937.
- HELLIOT, J. *et al.* “*The global gridded crop model intercomparison: data and modeling protocols for phase 1 (v1. 0)*”. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 2, p. 261-277, 2015.
- HEARN, A. B. “*OZCOT: A simulation model for cotton crop management*”. **Agricultural Systems**, v. 44, n. 3, p. 257-299, 1994.
- HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. EA. “*Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences*”. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 241-252, 2014.
- HETHERINGTON, A.M.; WOODWARD, F. I. “*The role of stomata in sensing and driving environmental Change*”. **Nature**, v. 424, n. 6951, p. 901, 2003.
- HESKETH, J. D.; BAKER, D. N.; DUNCAN, W. G. “*Simulation of Growth and Yield in Cotton: Respiration and the Carbon Balance*”. **Crop Science**, v. 11, n. 3, p. 394-398, 1971.

HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. *Management of farm irrigation systems*. **American Society of Agricultural Engineers**, 1990.

HOLZWORTH, D. P. *et al.*, “Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects”. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 276-286, 2015.

HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; MESSINA, C. D. “From genome to crop: integration through simulation modeling”. **Field Crops Research**, v. 90, n. 1, p. 145-163, 2004.

HOWELLS, M.; HERMANN, S.; WELSCH, M.; BAZILIAN, M.; SEGERSTRÖM, R.; ALFSTAD, T.; GIELEN, D.; ROGNER, H.; FISCHER, G.; VAN VELTHUIZEN, H.; WIBERG, D.; YOUNG, C.; ALEXANDER ROEHRL, R.; MUELLER, A.; STEDUTO, P.; RAMMA, I. “Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies”. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 7, p. 621–626, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1789>>.

HOULÈS, V. *et al.*, “Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria”. **Agronomie**, v. 24, n. 6-7, p. 339-349, 2004.

HSIAO, T. C. “Plant responses to water stress”. **Annual review of plant physiology**, v. 24, n. 1, p. 519-570, 1973.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dinâmica Territorial Agropecuária**.

Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/dinamica_agropecuaria/>.

Acesso em: 24/01/2018.

INMAN-BAMBER, N. G.; DE JAGER, J. M. “The reaction of two varieties of sugarcane to water stress”. **Field Crops Research**, v. 14, p. 15-28, 1986.

INMAN-BAMBER, N. G.; EVERINGHAM, Y.; MUCHOW, R. C. “Modelling water stress response in sugarcane: Validation and application of the APSIM-Sugarcane model”. In: **10th Australian Agronomy Conference, Hobart**. 2001.

INMAN-BAMBER, N. G.; DE JAGER, J. M. “Effect of water stress on sugarcane stalk growth and quality”. In: **Proceedings of the Annual Congress South African Sugar Technologists' Association**. Pretoria: SASTA, 1988. p. 140-144.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. “Water relations in sugarcane and response to water deficits”. **Field crops research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas**.

Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>

Acesso em: 04/02/2018.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Precipitação Total Anual**.

Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>>

Acesso em: 04/02/2018b.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z. “*Evapotranspiration: potential or reference*”. **IFAS Extension, ABE**, v. 343, 2003.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IZAURRALDE, R. C. *et al.*, “Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data”. **Ecological Modelling**, v. 192, n. 3-4, p. 362-384, 2006.

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**. Cambridge university press, 2005.

JÉGO, G.; PATTEY, E.; LIU, J. “*Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops*”. **Field crops research**, v. 131, p. 63-74, 2012.

JÉGO, G. *et al.*, “*Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the STICS soil–crop model*”. **Science of the Total Environment**, v. 394, n. 2-3, p. 207-221, 2008.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. “*Estimating evapotranspiration from solar radiation*”. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 89, p. 15-41, 1963.

JENSEN, M. E. “*Empirical Methods of Estimating or Predicting Evapotranspiration Using Radiation*”. In: Proc. ASAE Conf. “Evapotranspiration and Its Role in Water Resources Management”. USA-IL-Chicago, p. 49-53, 1967.

JENSEN, M.E. “*Water consumption by agricultural plants. In: Kozłowski (Eds.), Water Deficits and Plant Growth*”. Vol. II. **Plant Water Consumption and Response**. Academic Press, New York & London, p. 1–22. 1968.

JENSEN, M. E., BURMAN, R. D., ALLEN, R. G. “*Evapotranspiration and irrigation water requirements: a manual*”. **American Society of Civil Engineers**. Committee on Irrigation Water Requirements. New York, N.Y. 1990.

JENSEN M. E.; ALLEN R. G., “*qZsa*” **Task Committee on Revision of Manual 70** ; Ed. 2. MOP 70. 2016.

JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. “*Estimating evapotranspiration from solar radiation*”. **Proc. Journal of Irrigation. and Drainage Division**, v. 91, p. 203-205, 1963.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; LANDIM, P.M.B.; MATTOS, J.T. “*Gerenciamento Geoambiental*”. In: TUK-TORNISIELO, S.M.; GOBBI, N.; FORESTI, C.; LIMA, S.T. (orgs.) **Análise Ambiental: estratégias e ações**. São Paulo: T.A. Queiroz, Fundação Salim Farah Maluf; Rio Claro, SP: Centro de Estudos Ambientais – UNESP, 1995. p. 327-329.

JONES, J. W. HOOGENBOOM, G., PORTER, C. H., BOOTE, K. J., BATCHELOR, W. D., HUNT, L. A. “*The DSSAT cropping system model*”. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3, p. 235-265, 2003.

- JONES, P. G.; THORNTON, P. K. “*The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055*”. **Global environmental change**, v. 13, n. 1, p. 51-59, 2003
- JONES, J. W. *et al.*, “*Brief history of agricultural systems modeling*”. **Agricultural systems**, v. 155, p. 240-254, 2016.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R. “*CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*”. **Texas A & M University Press**, Ed. 1, p. 194, 1986.
- JONES, C. A. DYKE, P. T.; WILLIAMS, J. R.; KINIRY, J. R.; BENSON, V. W.; GRIGGS, R. H. “*EPIC: an operational model for evaluation of agricultural sustainability*”. **Agricultural Systems**, v. 37, n. 4, p. 341-350, 1991.
- JONES J.W. RITCHIE, J.T. “*Crop growth models*” **In: Management of Farm Irrigation Systems**, Hoffman, G.J, Howell, T.A., Solomon, K.H. (Eds.), American Society for Agricultural Engineering, p. 63-89, 1991.
- KAISER, W. M., “*Effects of water deficit on photosynthetic capacity*”. **Physiologia Plantarum**, v. 71, p. 142-149, 1987.
- KALAUGHER, E. *et al.*, “*An integrated biophysical and socio-economic framework for analysis of climate change adaptation strategies: the case of a New Zealand dairy farming system*”. **Environmental Modelling & Software**, v. 39, p. 176-187, 2013.
- KALNAY, E. *et al.*, “*The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*”. **Bulletin of the American meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437-472, 1996.
- KANAMITSU, M. *et al.*, “*NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)*”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 11, p. 1631-1644, 2002.
- KANG, Y.; KHAN, S.; MA, X “*Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security–A review*”. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 12, p. 1665-1674, 2009.
- KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. “*Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region*”. **Agricultural water management**, v. 50, n. 1, p. 9-25, 2001.
- KATERJI, N. AND PERRIER, A. “*A model of actual evapotranspiration for a field of lucerne – the role of a crop coefficient*”. **Agronomie**, v. 3, p. 513–521, 1983.
- KIMBALL, B. *et al.*, “*Prediction of Evapotranspiration and Yields of Maize: An Inter-comparison among 29 Maize Models*”. **In: Meeting of working Group Medicago sativa**, 2016.
- KIRNAK, H.; SHORT, T.H. “*An evapotranspiration model for nursery plants grown in a lysimeter under field conditions*”. **Journal of Agriculral and Forest**, v. 25, p.57-63. 2001.
- KISTLER, R. *et al.*, “*The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation*”. **Bulletin of the American Meteorological society**, v. 82, n. 2, p. 247-268, 2001.
- KÖPPEN, W.; GEIGER R., “*Handbuch der klimatologie*”. **Gebrüder Borntraeger**. Berlin, Germany, p. 1-44, 1936

- KRIEDMANN, P.E.; LOVEYS, B.R. & DOWNTON, J.S. “Internal control of stomatal physiology and photosynthesis. II Photosynthetic responses to phaseic acid. Australian”. **Journal of Plant hysiology**, Melbourne, 2:553-567, 1975.
- KEATING, B.A. *et al.* “An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation”. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 267-288, 2003.
- KÖPPEN W., GEIGER R., “*Handbuch der klimatologie*“. Berlin, Germany: Gebrüder Borntraeger, p. 1-44, 1936
- KRISHNAN, P. *et al.*, “Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies”. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 122, n. 2, p. 233-242, 2007.
- LANDAU, E. C. *et al.*, “Expansão potencial da produção de milho 2ª safra no Brasil no sistema de sucessão soja-milho considerando o zoneamento de risco climático 2014/15”. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Disponível em: <
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1038360>>.
- LANGE, O.L.; LÖSCH, R.; SCHULZE, E.D.; KAPPEN, L. “Responses of stomata to changes in humidity”. **Planta, Heidelberg**, v.100, p.76-86, 1971.
- LHOMME, J.-P. “A theoretical basis for the Priestley-Taylor coeficient”. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 82, n. 2, p. 179-191, 1997.
- LINDSAY, R. *et al.*, “Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic”. **Journal of Climate**, v. 27, n. 7, p. 2588-2606, 2014.
- LITTLEBOY, M. SILBURN, D. M.; FREEBAIRN, D. M.; WOODRUFF, D. R.; HAMMER, G.L. “PERFECT-A computer simulation model of Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques”. **Bulletin-Queensland Department of Primary Industries (Australia)**, 1989.
- LIU, X. XU, C., ZHONG, X., LI, Y., YUAN, X.; CAO, J. “Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement”. **Agricultural water management**, v. 184, p. 145-155, 2017.
- LOBATO, O. J. M.; E. J.V. LOBATO. “Considerações sobre a evapotranspiração potencial medida e calculada no município de Goiânia e circunvizinhos”. **Anais das Escolas de Agronomia e Veterinária**, v.1, p. 50-73. 1979.
- LOARIE, S. R. *et al.* “Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil”. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105, 2011.
- LOURENCE, F. J.; PRUITT, W. O. “Energy Balance and Water Use of Rice Grown in the Central Valley of California”. **Agronomy Journal**, v. 63, n. 6, p. 827-832, 1971
- LU, J.; MCNULTY, S. G.; AMATYA, D. M. “A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern united states”. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 3, p. 621-633, 2005.
- LUDWIG, F., ASSENG, S., “Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia”. **Agricultural Systems**, v. 90, p. 159-179, 2006.
- LUO, Q., BELLOTTI, W., WILLIAMS, M., BRYAN, B. “Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia”. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, p. 273-285, 2005.

- LUO, L.; VAN DER VOET, E.; HUPPES, G. “Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1613-1619, 2009.
- MACEDO, I. de C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. “Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil”. Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, v. 19, 2004.
- MACEDO, I.C.; SEABRA, J.EA; SILVA, J.EAR. “Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020”. **Biomass and bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.
- MAKKINK, G. F. ‘Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters’. , **J. Instit. Water Engineers**, v. 11, p. 277–288, 1957.
- MANZATTO, C. V. “Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil: seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo”. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., Rio de Janeiro. SBCS: Embrapa Solos. Documentos, 101, 2008.
- MANZATTO, C. V. *et al.*, “Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.” Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- MAO, L. M.; BERGMAN, M. J.; TAI, C. C. “Evapotranspiration measurement and estimation of three wetland environments in the upper st. Johns river basin, Florida”. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 5, p. 1271-1285, 2002.
- MARIN, F. R. *et al.* “Cana-de-açúcar”. In: **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, p. 111-130, 2009.
- MARIN, F. R. *et al.*, “Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane”. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.
- MARIN, F. R. *et al.*, “Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil”. **Climatic Change**, v. 117, n. 1-2, p. 227-239, 2013
- MARIN, F. R. “Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos”. 2014. 263p. Tese de livre docência - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. 2014
- MARIN, F. R. *et al.* “Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil”. **Climatic Change**, v. 117, n. 1-2, p. 227-239, 2013.
- MARTIN, G.M. *et al.*, “The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations”. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723-757, 2011.
- MARTIN, G. M.; LEVINE, R. C. “The influence of dynamic vegetation on the present-day simulation and future projections of the South Asian summer monsoon in the HadGEM2 family”. **Earth Syst. Dynam.**, v. 3, p. 245-261, 2012.
- MARTIN B.; RUIZ-TORRES NA. “Effects of Water-Deficit Stress on Photosynthesis, Its Components and Component Limitations, and on Water Use Efficiency in Wheat (*Triticum aestivum* L.)”. **Plant Physiology**. v.2, n.100, p. 733-9, 1992.

- MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. “Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges.” **Ecological applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.
- MARTÍNEZ, M. et al. “Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia”. **Agronomía Colombiana**, v. 34, n. 3, p. 374-384, 2016.
- MARTHA JR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. “Land-saving approaches and beef production growth in Brazil”. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012.
- MCCABE, G.J.; MARKSTROM, S.L. “A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report”. p. 6, 2007.
- MCCOWN, R. L. “An evaluation of the influence of available soil water storage capacity on growing season length and yield of tropical pastures using simple water balance models”. **Agricultural Meteorology**, v. 11, p. 53-63, 1973
- MCCOWN, R. L.; WILLIAMS, J. “AUSIM: A cropping systems model for operational research”. In: **SSA IMACS 1989 Biennial Conference on Modelling and Simulation**. p. 25-27, 1989.
- MCCOWN, R.L., HAMMER, G.L., HARGREAVES, J.N.G., HOLZWORTH, D., HUTH, N.I., APSIM “An agricultural production system simulation model for operational research”. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 39, p. 225-231, 1995.
- MCCOWN, R. L.; HAMMER, G. L.; HARGREAVES, J. N. G.; HOLZWORTH, D. P.; FREEBAIRN, D. M. “APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research”. **Agricultural systems**, v. 50, n. 3, p. 255-271, 1996.
- MCMAHON, T. A., PEEL, M. C., LOWE, L., SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T. R. “Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis”. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 4, p. 1331-1363, 2013.
- MCNAUGHTON, K. G. AND T. A. BLACK, “A Study of Evapotranspiration from a Douglas Fir Forest Using the Energy Balance Approach”. **Water Resources Research**, v. 9, p. 1579-1590, 1973.
- MEDEIROS, A.T.; SENTELHAS, A.C.; LIMA, R.N. “Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Montheith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraíba – CE”. **Eng Agric**, Jaboticabal, v. 23, n.1, p. 31-40, 2003.
- MEIRELES, E. et al., “Zoneamento agroclimático: Um estudo de caso para o café”. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 28, n. 241, p. 50-57, 2007.
- MENDONÇA, J. C. SOUSA, E. D., BERNARDO, S., DIAS, G. P; GRIPPA, S “Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETO) na região Norte Fluminense, RJ”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.
- MEYER, W. S. “Standard reference evaporation calculation for inland, south eastern Australia”. **Technical Report, CSIRO Land and Water** ,35, p. 98, Adelaide, 1999.

MEYER, D., L. MYTELKA, R. PRESS, E.L. DALL'OGGIO, DE SOUSA Jr, P.T. & A. GRUBLER. "*Brazilian Ethanol: Unpacking a Success Story of Energy Technology Innovation. Historical Case Studies of Energy Technology Innovation*". In: Capítulo 24, "*The Global Energy Assessment*". GRUBLER A., AGUAYO, F., GALLAGHER, K.S., HEKKERT, M., JIANG, K., MYTELKA, L., NEIJ, L., NEMET, G. & C. WILSON. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012.

MITIDIERI, F. J.; MEDEIROS, J. X. "*Zoneamento Agrícola de Risco Climático Ferramenta de auxílio ao seguro rural*". **Revista de Política Agrícola**, v. 17, n. 4, p. 33-46, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMAa, 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial>>. Acesso em: 24/02/2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMAb, 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/item/8188>>. Acesso em: 24/02/2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/macrozee-da-amaz%C3%B4nia-legal.html>>. Acesso em: 30/03/2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMAa, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial>>. Acesso em: 31/07/2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMAb, 2018. Disponível em: <<http://cggamgati.funai.gov.br/index.php/pngati/instrumentos/>>. Acesso em: 31/07/2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMAc, 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica_emdesenvolvimento>. Acesso em: 04/08/2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2019. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/unidades-de-conservacao/o-que-sao.html>>. Acesso em: 24/04/2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA, , Plano ABC -Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/plano-abc-agricultura-de-baixaemissao-de-carbono>>. Acesso: 24/05/2018.

MOENE, A. F.; VAN DAM, J. C. "*Transport in the atmosphere-vegetation-soil continuum*". Cambridge University Press, p. 436, 2014.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P. C. "*Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management*". **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264-276, 2014.

MONTEITH, J. L. "*Evaporation and environment*". In: **Symp. Soc. Exp. Biol.** 1965. p. 4.

MONTEITH, J. L. "*The quest for balance in crop modeling*". **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 695-697, 1996.

- MOORE, P. H. "Anatomy and morphology". In: **Developments in crop science**. Elsevier, p. 85-142, 1987.
- MOORE, P. H.; PATERSON, A. H.; TEW, T. "Sugarcane: the crop, the plant, and domestication". **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**, p. 1-17, 2013.
- MORIONDO, M.; GIANNAKOPOULOS, C.; BINDI, M. "Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation". **Climatic change**, v. 104, n. 3-4, p. 679-701, 2011.
- MOSS, R. H. *et al.*, "The next generation of scenarios for climate change research and assessment". **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747, 2010.
- MOZAMBANI, A. E. *et al.*, "História e morfologia da cana-de-açúcar". In: SEGATO, S. V. *et al.*, **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: V 2, CP 2, p. 11-18, p. 415, 2006.
- MYERS, N. *et al.* "Biodiversity hotspots for conservation priorities". **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853, 2000.
- NASS, L. L.; PEREIRA, P. A. A.; ELLIS, D. "Biofuels in Brazil: An overview." **Crop Science**, v. 47, n. 6, p. 2228-2237, 2007.
- NCARS-National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). "The Climate Data Guide: NCEP-NCAR (R1): An Overview." Disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ncep-ncar-r1-overview>>. Acessado em: 08/01/2019.
- NEARING, A., WILLIAMS, J.; SKIDMORE, E.; VALENTIN, C.; KING, K.; SAVABI, R. "Using soil erosion models for global change studies." **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 51, no. 5, 1996, p. 381-386.
- NELSON, G. C. *et al.*, "Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree". **Agricultural Economics**, v. 45, n. 1, p. 85-101, 2014.
- NELSON, G. C. *et al.*, "Food security, farming, and climate change to 2050: scenarios, results, policy options". **Intl Food Policy Res Inst**, v. 172, 2010.
- NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. "Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica". **Revista de Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, pp. 587-604 2007
- NIEDER, R.; BENBI, D. *Handbook of processes and modeling in the soil-plant system*. Food Products Press, p. 731, 2003.
- NIPE-UNICAMP, IBGE and CTC *apud* UNICA. Mapa da Produção, Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>>. Acessado em :12 abril 2016.
- NOKES, S.E. "Evapotranspiration" In: Capítulo 4, **Environmental Hydrology**, Ward, A.D. and Elliot, W.J. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, p. 91-131, 1995.
- NPN- National Phenology Network (USA)- Glossário. Disponível em: <<https://www.usanpn.org/glossary>>. Acessado em: 10 de janeiro de 2018.
- NYKO, D.; "A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural?". **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p 399-442, 2013.

- OHMURA, A. “Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, n. 4, p. 595-598, 1982.
- OLIVEIRA, G. G. *et al.* “Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais”. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 4, p. 388-395, 2015.
- OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. *et al.* “Análise da precipitação e sua relação com sistemas meteorológicos em Seropédica, Rio de Janeiro”. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 140-149, 2014.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M.; AZEVEDO, J. R. G. D.; SANTOS, F. X. D. “Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos”. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 1, 2008.
- OMM, Organização Meteorológica Mundial “The Role of Climatological Normals in a Changing Climate”. **WMO/TD-N. 1377**, Geneva, p. 130, 2007.
- OMM, Organização Meteorológica Mundial “Guide to climatological practices”. **Secretariat of the World Meteorological Organization**, N. 100, p. 117, 2011.
- OKE, T. R., “Boundary Layer Climates”. New York: Methuen, p. 435, 1987
- ORLANSKI, I. “A rational subdivision of scales for atmospheric processes.” **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56 (1975).
- LOUDIN, L.; HERVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F.; LOUMAGNE, C. “Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling”. **Journal of hydrology**, v. 303, n. 1-4, p. 290-306, 2005.
- PACETTI, T.; LOMBARDI, L.; FEDERICI, G. “Water–energy Nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods”. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 278-291, 2015.
- PELTON, W. L.; KING, K. M.; TANNER, C. B. “An Evaluation of the Thornthwaite and Mean Temperature Methods for Determining Potential Evapotranspiration”. **Agronomy Journal**, v. 52, n. 7, p. 387-395, 1960.
- PENMAN, H. L. “Natural evaporation from open water, bare soil, and grass”. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 193, n. 1, p. 120-146, 1948.
- PENMAN, H. L. “Vegetation and hydrology”. **Soil Science**, v. 96, n. 5, p. 357, 1963.
- PEREIRA, A.R; CAMARGO, A.P., “An analysis of the criticism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration”. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 46, p. 149 157, 1989.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. “Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas”. Guaíba: **Agropecuária**, p. 478, 2002.
- POYEN, E. F. B.; GHOSH, A. K.; PALASHKUNDU, P. “Review on Different Evapotranspiration Empirical Equations”. **International Journal of Advanced Engineering, Management and Science**, v. 2, n. 3, 2016.
- POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. “Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria”. **Irrigation and**

Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage, v. 55, n. 2, p. 201-215, 2006.

PLUMMER N.; ALLSOP T.; LOPEZ J.A. “*Guidance On Climate Observation Networks and Systems*”. (WMO-No. 1185). 2003.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. “On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters”. *Monthly weather review*, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PROBERT, M. E. *et al.*, “*APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems*”. **Agricultural systems**, v. 56, n. 1, p. 1-28, 1998.

PRUITT, W. O. “*Cyclic relations between evapotranspiration and radiation*”. **Transactions of the ASAE**, v. 7, n. 3, p. 271-0275, 1964.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. “*Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars*”. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, n. 4, p. 249-258, 2000.

RATTER, J.A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. “*The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity*”. **Annals of botany**, v. 80, n. 3, p. 223-230, 1997.

RAZZAGHI F.; SEPASKHAH A. R.; “*Assessment of nine different equations for ET_o estimation using lysimeter data in a semi-arid environment*”. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 56, n.1, p. 1-12, 2010.

RESCK, D. V. S. *et al.* “*Efeito do plantio direto e do arado de discos nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro, argiloso sob vegetação de Cerrado*”. **Relatório técnico do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados: 1991 a 1995**, Planaltina, DF, p. 135-138, 1997.

RFA, *Renewable Fuels Association* - Industry Statistics, 2016. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454099103927-61e598f7-7643>>. Acessado em: 30 de julho de 2017.

RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. Disponível em:< <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal>>. Acessado em: 05/01/2019.

RIDDLE, C. W. “*Agroclimatology*”. In: OLIVER, J. E. (Ed.) **Encyclopedia of World Climatology**. Springer, Dordrecht, p. 14-16, 2008.

RIENECKER, M. M. *et al.*, “*MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications*”. **Journal of climate**, v. 24, n. 14, p. 3624-3648, 2011.

RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. “*Avaliação da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma cerrado por meio de modelagem dinâmica da paisagem*”. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, 2016.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. “*Fitofisionomias do bioma Cerrado*”. **Embrapa Cerrados-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 1998.

RITCHIE, J. T. “*Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*”. **Water resources research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

- RITCHIE, J. R.; OTTER, S. “*Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model*”. **ARS-United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USA)**, 1985.
- ROBERTSON, M. J. *et al.* “*Physiological analysis of early season deficit and sugarcane productivity*”. **Field Crops Research**, v. 64, p. 211-227, 1999.
- ROBERTSON, A. W.; AMOR, I; VM; HANSEN, J. W. “Downscaling of seasonal precipitation for crop simulation.” **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 6, p. 677-693, 2007.
- ROBERTSON, M.J., WHISH, J., SMITH, F.P. “*Simulating competition between canola and wild radish. Proceedings of the twelveth Aust*”. **Res. Assembly on Brassicas**, October, Geelong, Australia, 2001.
- ROCHA, R. P. *et al.*, “*Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain*”. **Climatic Change**, v. 125, n. 1, p. 95-109, 2014.
- RODRÍGUEZ-PUEBLA, C. *et al.*, “*Effects of climate variation on winter cereal production in Spain*”. **Climate Research**, v. 34, n. 3, p. 223-232, 2007.
- ROSEMBERG, N. J.; BLADE, B. L.; VERMA, S. B. “*Microclimate: the biological environment*”. **Wiley**, ed. 2. New York: J., 495 p, 1983.
- ROSENZWEIG, C. *et al.*, “*The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies*”. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 166-182, 2013.
- ROSENZWEIG, C. *et al.*, “*Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison*”. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3268-3273, 2014.
- ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. “*Towards proalcool II-A review of the Brazilian bioethanol programme*”. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 2, p. 115–124, 1998.
- RÖTTER, R. P. *et al.*, “*Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models*”. **Field Crops Research**, v. 133, p. 23-36, 2012.
- RÖTTER, R.; VAN KEULEN, H.; JANSEN, M. J. W. “*Variations in yield response to fertilizer application in the tropics: I. Quantifying risks and opportunities for smallholders based on crop growth simulation*”. **Agricultural Systems**, v. 53, n. 1, p. 41-68, 1997.
- ROUNSEVELL, M. D. A.; BRIGNALL, A. P. “*The potential effects of climate change on autumn soil tillage opportunities in England and Wales*”. **Soil and Tillage Research**, v. 32, n. 4, p. 275-289, 1994.
- RUANE, Alex C. *et al.*, “*An AgMIP framework for improved agricultural representation in integrated assessment models*”. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 12, p. 125003, 2017.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. “*Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data*”. **Remote sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

- SALO, T. J. *et al.*, “Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization”. **The Journal of Agricultural Science**, v. 154, n. 7, p. 1218-1240, 2016.
- SANTIAGO, A. V. “Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal”. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, 2001.
- SASHA, S. *et al.*, “The NCEP climate forecast system reanalysis”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015-1058, 2010.
- SÃO PAULO, “Resolução SMA n.4, de 18 de setembro de 2007”. Dispõe sobre o Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro no Estado De São Paulo. **Diário Oficial do Estado**, 20 set. 2008a. (Seção I, p. 93 - 94).
- SAU, F.; BOOTE, K. J.; BOSTICK, W. M.; JONES, J. W.; MÍNGUEZ, M. I. “Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models”. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1243-1257, 2004.
- SCARPARE, F. V. *et al.* “Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil”. **Journal of cleaner production**, v. 133, p. 1318-1327, 2016.
- SCHNEIDER, K. KETZER, B., BREUER, L., VACHÉ, K. B., BERNHOFER, C.; FREDE, H. G. “Evaluation of evapotranspiration methods for model validation in a semi-arid watershed in northern China”. **Advances in Geosciences**, v. 11, p. 37-42, 2007.
- SCHULZE, E.D.; LANGE, O.L.; BUSCHBOM, H.; KAPPEN, L.; EVENARI, M. “Stomatal responses to changes in humidity in plants growing in the desert”. **Planta**, Berlin, v.108, p.259-270, 1972.
- SCOLFARO, J. R. *et al.* “Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais”. Lavras: UFLA, 2007. Disponível em: http://www.zee.mg.gov.br/pdf/zoneamento_e_cenarios_exploratorios/1zoneamento_ecologico_economico_de_mg.pdf. Acesso em: 30/11/2018.
- SEGATO, S. V. *et al.* “Atualização em produção de cana-de-açúcar”. **Piracicaba: CP**, v. 2, p. 415, 2006.
- SENEVIRATNE, S. I. *et al.*, “Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review”. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, 2010.
- SEDIYAMA, G. C. *et al.*, “Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.
- SHUKLA, J.; MINTZ, Y. “Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate”. **Science**, v. 215, n. 4539, p. 1498-1501, 1982.
- SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. “Amazon deforestation and climate change”. **Science**, v. 247, n. 4948, p. 1322-1325, 1990.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; CALDER, I. R. “Has the Priestley-Taylor Equation Any Relevance to Forest Evaporation?”. **Journal of Applied Meteorology** . v. 18, p. 639-646, 1979.

- SHIAU, S.Y. DAVAR, K.S. “*Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions*”. **Journal of Hydrology**, v. 18, n 3–4, p.349-365, 1973.
- SHIH, S. F.; GASCHO, G. J. “*Water requirement for sugarcane production*”. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 4, p. 934-0937, 1980.
- SHIKIDA, P. F. A. “*Expansão canavieira no Centro-Oeste: limites e potencialidades*”. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 2, p. 122-137, 2013.
- SIEG- Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás. Disponível em: <http://www.zee.go.gov.br/>. Acessado em: 30/11/2018.
- SILVA, S. T. “*Zoneamento Ambiental, instrumento de Gestão Integrada do Meio Ambiente*”. In: ROCHA, J. C. C. et. al. **Política nacional de meio ambiente: 25 anos da Lei n. 6.938/81**. Belo Horizonte, Del Rey, p. 151-173, 2007.
- SILVA, A. A.; MIZIARA, F. “*Avanço do setor sucroalcooleiro e expansão da fronteira agrícola em Goiás*”. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 399-407, 2011.
- SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. “*DSSAT v4. 5-Canegro Sugarcane Plant Module*”. **South African Sugarcane Research Institute**, 2008.
- SLATYER, R. O.; MCILROY I. C. “*Practical Microclimatology*”. **CISRO**, Melbourne, Australia. 1967.
- SMITH, M. “*Report on the expert consultation on revision of crop water requirements*”. Rome: FAO, p. 45, 1991.
- SMITH, M. “*CROPWAT - A Computer Program for Irrigation Planning and Management*”, **FAO Irrig. Drain Pap No. 46**, Roma, Itália, 1992.
- SNOW, V. O.; HUTH, N. I. “*The APSIM–Micromet module*”. **HortResearch, Auckland**, 2004.
- SOUZA, A. P.; CARVALHO, D. F., SILVA, L. B. D., ALMEIDA, F. T.; ROCHA, H. S. “*Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade*”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.
- SPAROVEK, G.; BARRETTO, A.; BERNDES, G.; MARTINS, S.; MAULE, R. “*Environmental, land-use and economic implications of Brazilian sugarcane expansion 1996-2006*”. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 14, n. 3, p. 285–298, 2009.
- STANNARD, D. I. “*Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland*”. **Water Resources Research**, v. 29, n. 5, p. 1379-1392, 1993.
- STANGHELLINI C. “*Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*”. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 150p., 1987.
- STANGHELLINI, C. “*Evapotranspiration in greenhouse with special reference to Mediterranean conditions*”. **Acta Horticulturae**, Leuven, n. 335, p. 296-304, 1993.
- STEDUTO, P., H., T.C. HSIAO, E. FERERES, D. RAES. (2012). “*Crop yield response to water*”. **Irrigation and drainage paper N. 66**. Rome: fao.

- STEINER, J. L.; HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D. “*Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum*”. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 1, p. 240-247, 1991.
- STEPHENS, J. C.; STEWART, E. H. “*A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration*”. **Publication**, v. 62, p. 123-133, 1963.
- STÖCKLE, C.O. *et al.*, “*CropSyst model evolution: From field to regional to global scales and from research to decision support systems*”. **Environmental modelling & software**, v. 62, p. 361-369, 2014.
- STÖCKLE, C.O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. “*CropSyst, a cropping systems simulation model*”. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 289-307, 2003.
- STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. “*Cropping systems simulation model user’s manual*”. **Washing State University, Pullman, Washington, USA**, p. 235, 2003.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. “*Efeito do sistema de preparo na compactação do solo disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro*”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.
- STRASSBURG, B. B. N. *et al.* “*When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil*”. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.
- STRULLU, L. *et al.*, “*Multisite yield gap analysis of Miscanthus × giganteus using the STICS model*”. **BioEnergy Research**, v. 8, n. 4, p. 1735-1749, 2015.
- STULL, R. B. “*An Introduction to Boundary Layer Meteorology*”. Dordrecht: Kluwer. Academic Publishers, p. 666, 1988.
- SUBEDI, A. CHÁVEZ, J. L. “*Crop Evapotranspiration (ET) Estimation Models: A Review and Discussion of the Applicability and Limitations of ET Methods*”. **Journal of Agricultural Science**, v. 7, n 6, p. 50-68, 2015.
- SULEIMAN, A. A.; HOOGENBOOM, G. “*Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for daily reference evapotranspiration estimation in Georgia*”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 2, p. 175-182, 2007.
- SUMNER, D. M.; JACOBS, J. M. “*Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration*”. **Journal of Hydrology**, v. 308, n. 1-4, p. 81-104, 2005.
- TABARI, H. “*Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates*”. **Water resources management**, v. 24, n. 10, p. 2311-2337, 2010.
- TAWFIK, A. B.; STEINER, A. L. “*The role of soil ice in land-atmosphere coupling over the United States: A soil moisture–precipitation winter feedback mechanism*”. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D2, 2011.
- TAN, G.; SHIBASAKI, R. “*Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration*”. **Ecological Modelling**, v. 168, n. 3, p. 357-370, 2003.
- TAPIADOR, F.J. *et al.*, “*Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications*”. **Atmospheric Research**, v. 104, p. 70-97, 2012.
- TAYLOR, S. A.; GAYLEN L. A. **Physical edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils.** 1972.

- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. “An overview of CMIP5 and the experiment design”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, pp. 485-498, 2012.
- TAYT-SOHN, F. C. O.; PEREIRA, A. O.; NUNES, A. M. B. “Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar na região da bacia hidrográfica do Paranaíba”. Tese de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014
- TAYT'SOHN, F. C. O.; NUNES, A. M. B.; PEREIRA, A. O. “Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin – Brazil”. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, n. July, p. 436–445, 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418302691>>.
- TEIXEIRA, A. H. C., DE AZEVEDO, P. V., DA SILVA, B. B.; SOARES, J. M. “Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina-PE”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, V. 3, p. 327-330, 1999
- THORNTON, C.W. “An approach toward a rational classification of climate”. *Geographical Review*, NY, v. 38, p. 55–94, 1948.
- THORNTON, C.W. “A Re-examination of the Concept and Measurement of Potential Evapotranspiration. *Publications in Climatology*”, v. 7, No. 1, Centerton, New Jersey, p. 200 209, 1954.
- THORBURN, P.J., BIGGS, J.S., COLLINS, K., PROBERT, M.E. “Using the APSIM model to estimate nitrous oxide emissions from diverse Australian sugarcane production systems”. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 136, p. 343-350, 2010.
- TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. “Global food demand and the sustainable intensification of agriculture”. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108>>.
- TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. “The bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment”. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p. 335–348. 2000
- TRANSEAU, E. N. “Forest centers of eastern America”. **The American Naturalist**, v. 39, n. 468, p. 875-889, 1905.
- TRNKA, M. et al., “Climate-driven changes of production regions in Central Europe”. **Plant, Soil and Environment**, v. 55, n. 6, p. 257-266, 2009.
- TUBIELLO, F. N.; EWERT, F. “Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change”. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 57-74, 2002.
- TURC L. “Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date”. **Annals of Agronomy**, v. 12: p. 13-49, 1961.

UDOP, União dos Produtores de Bioenergia, Disponível em: http://www.udop.com.br/index.php?item=unidades&cn=am&id_pais=1. Acessado em: 10 de março de 2015.

UEHARA, G.; TSUJI, G. Y. “*Overview of IBSNAT*”. In: **Understanding options for agricultural production**. Springer, Dordrecht, p. 1-7, 1998

UNU- The United Nations University, Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources, The Nexus Approach. Disponível em: <<https://flores.unu.edu/en/research/nexus>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

UPPALA, S. M. *et al.*, “*The ERA-40 re-analysis*”. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 131, n. 612, p. 2961-3012, 2005.

V. DORNBURG, A D. VAN VUUREN, D G. VAN DE VEN, B H. LANGEVELD, B M. MEEUSEN, C.; M. BANSE, C M. VAN OORSCHOT, D JAN ROS, D G. J. VAN DEN BORN, D HARRY AIKING, E M. LONDO, F.; H. MOZAFFARIAN, F PITA VERWEIJ, E. L. “*Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy*”. **Energy and Environmental Science**, v. 3, n. 3, p. 258–267, 2010.

VALADE, A. *et al.*, “*Modeling sugarcane yield with a process-based model from site to continental scale: uncertainties arising from model structure and parameter values*”. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1225-1245, 2014.

VALIPOUR, M. *et al.*, Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 50-60, 2017.

VAN BAVEL, C. H. M. A “*Drought Criterion and Its Application in Evaluating Drought Incidence and Hazard*”. **Agronomy Journal**, v. 45, n. 4, p. 167-172, 1953.

VAN DER LAAN, M.; JUMMAN, A.; PERRET, S. R. “*Environmental benefits of improved water and nitrogen management in irrigated sugar cane: A combined crop modelling and life cycle assessment approach*”. **Irrigation and drainage**, v. 64, n. 2, p. 241-252, 2015.

VAN DIEPEN, C. A., WOLF, J.; VAN KEULEN, H.; RAPPOLDT, C. “*WOFOST: a simulation model of crop production*”. **Soil use and management**, v. 5, n. 1, p. 16-24, 1989.

VAN DILLEWIJN, C. “*Botany of sugarcane*”. **Waltham: Chronica Botanica**, 371 p., 1952.

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

VAN KEULEN, H.; WOLF, J. “*Modelling of agricultural production: weather, soils and crops Pudoc Wageningen*”. **Simulation Monographs**, p. 478, PUDOC, Wageningen, 1986.

VAN RIJ, E.; KORTHALS ALTES, W. K. “*The merits of outmoded planning instruments for improving metropolitan green areas: The Midden-Delfland approach*”. **Planning Theory & Practice**, v. 9, n. 3, p. 345-362, 2008.

VAN VUUREN, D. P. *et al.*, “*The representative concentration pathways: an overview*”. **Climatic change**, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

- VAN WIJK, W.R.; DE VRIES, D.A. “*Evapotranspiration*”. **Journal of Agricultural Science**, v. 2, p.105-119, Netherlands,1954.
- VERMA, R. S. “*Sugarcane ratoon management, 202*”. **Lucknow: International Book Distributing Co. Pvt. Ltd**, 2002.
- VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. “*Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions*”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, p. 330–338, 1978.
- VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. B. “*Ajuste do método de Priestley-Taylor às condições climáticas locais*”. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal , v. 26, n. 2, p. 395-405,2006.
- VON BLOTTNITZ, H.; CURRAN, M. A. “*A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective*”. **Journal of cleaner production**, v. 15, n. 7, p. 607-619, 2007
- XIONG, W. *et al.*, “*Calibration-induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on global maize yield*”. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 8, n. 3, p. 1358-1375, 2016.
- XU, C.-Y.; SINGH, V. P. “*Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation*”. **Hydrological processes**, v. 14, n. 2, p. 339-349, 2000.
- WANG, Y. *et al.*, “*Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects*”. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 82, n. 6, p. 1599-1628, 2004.
- WANG, X. *et al.*, “*Evaluation of EPIC for assessing crop yield, runoff, sediment and nutrient losses from watersheds with poultry litter fertilization*”. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 1, p. 47-59, 2006.
- WEBB, E. K. “*Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability*”. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 96, p. 67-90, 1970. doi:[10.1002/qj.49709640708](https://doi.org/10.1002/qj.49709640708).
- WEIß, M.; MENZEL, L. “*A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modelling in semi-arid environments*”. **Advances in Geosciences**, v. 18, p. 15-23, 2008.
- WHISLER, F. D. *et al.*, “*Crop simulation models in agronomic systems*”. **Adv. Agron**, v. 40, n. 1, p. 41-208, 1986.
- WHITE, J. W. *et al.*, “*Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production*”. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 357-368, 2011.
- WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; KINIRY, J. R.; SPANEL, D. A. “*The EPIC crop growth model*”. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 497-0511, 1989.
- WILM, H. G.; THORNTHWAITE, C. W. “*Report of the committee on evapotranspiration and transpiration 1943-1944*”. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v.25, part 5, p.686-693, 1944
- WILMER C, FRICKER M. “*Stomata*”. Springer Netherlands, ed. 2, v. 135, p. 375; 1996.
- WILLMOTT, C. J. *et al.* “*Statistics for the evaluation and comparison of models*”. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

- WILLIAMS, J. R. *et al.*, “The EPIC crop growth model”. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 497-0511, 1989.
- WIESNER, C. J. *et al.*, “Climate, irrigation and agriculture”. **Climate, irrigation and agriculture**, p. 246, 1970.
- WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E. “Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual”. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, 2013.
- WOLF, J.; VAN DIEPEN, C. A. “Effects of climate change on grain maize yield potential in the European Community”. **Climatic Change**, v. 29, n. 3, p. 299-331, 1995.
- WREGE, M. S. *et al.*, “Regiões potenciais para cultivo da cana-de-açúcar no Paraná, com base na análise do risco de geadas”. **Revista brasileira de agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 113-122, 2005.
- YANG, Y. *et al.*, “Impact of future climate change on wheat production in relation to plant-available water capacity in a semiarid environment”. **Theoretical and applied climatology**, v. 115, n. 3-4, p. 391-410, 2014.
- YATES, D.; STRZEPEK, K. “Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change”. **International Institute of Applied Systems Analysis Working Papers**, p. 94-46. v. 28, 1994.
- YODER, R. E.; ODHAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. “Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States”. **Applied engineering in agriculture**, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.
- ZEMA, D. A. *et al.*, “Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values”. **Agricultural Water Management**, v. 115, p. 55-65, 2012.
- ZHAO, L. *et al.*, Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **Journal of Geographical Sciences**, v. 23, n. 2, p. 359-369, 2013.
- ZULLO, J.J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. “Impact assessment study of climate change on agricultural zoning”. **Meteorological Applications**, v. 13, n. S1, p. 69-80, 2006.
- ZULLO, J.; PEREIRA, V. R.; KOGA-VICENTE, A. “Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region”. **Climatic change**, v. 149, n. 3-4, p. 489-502, 2018.