



RAFAEL ALDIGHIERI MORAES

**MONITORAMENTO E ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DA CULTURA DE CANA-
DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO POR MEIO DE DADOS ESPECTRAIS
E AGROMETEOROLÓGICOS**

CAMPINAS

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

RAFAEL ALDIGHIERI MORAES

**MONITORAMENTO E ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DA CULTURA DE CANA-
DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO POR MEIO DE DADOS ESPECTRAIS
E AGROMETEOROLÓGICOS**

Orientador: Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha

Co-Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração em
Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO RAFAEL ALDIGHIERI MORAES
E ORIENTADO PELO PROF.DR.JANSLE VIEIRA ROCHA

Assinatura do Orientador

CAMPINAS

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M791m Moraes, Rafael Aldighieri
Monitoramento e estimativa da produção da cultura
de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de
dados espectrais e agrometeorológicos / Rafael
Aldighieri Moraes. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Jansle Vieira Rocha.
Coorientador: Rubens Augusto Camargo Lamparelli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Series temporais. 2. Modelagem. 3.
Sensoriamento remoto. 4. Produtividade. 5. Cana-de-
açúcar. I. Rocha, Jansle Vieira, 1961-. II. Lamparelli,
Rubens Augusto Camargo. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.
Título.

Título em Inglês: Monitoring and estimation of sugarcane production using
spectral and agrometeorological data

Palavras-chave em Inglês: Time series, Modeling, Remote sensing, Yield,
Sugarcane

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

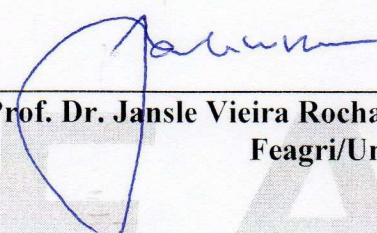
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Jansle Vieira Rocha, Denise Cybis Fontana, Maurício dos
Santos Simões, Angélica Prael-Pantano, Luiz Henrique
Antunes Rodrigues

Data da defesa: 17-12-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Rafael Aldighieri Moraes**, aprovada pela Comissão Julgadora em 17 de dezembro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



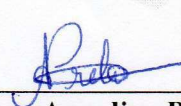
Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



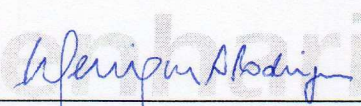
Profa. Dra. Denise Cybis Fontana - Membro Titular
UFRGS



Dr. Maurício dos Santos Simões – Membro Titular
Usina São Martinho



Profa. Dra. Angelica Prael-Pantano - Membro Titular
IAC



Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues - Membro Titular
Feagri/Unicamp

*Aos meu pais **Angelo Sávio Bertini Moraes** e **Cleusa Aparecida Aldighieri Moraes**, aos meus irmãos **Saulo Aldighieri Moraes** e **Tales Aldighieri Moraes**, que mesmo a distância se fizeram presentes.*

DEDICO

*À minha querida **Cristina Carvalho Gomes** que sempre dedicou paciência, amor e carinho.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema, causa primeira de todas as coisas.

A Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e a Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) pela oportunidade de pesquisa e aprimoramento, e a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida.

Ao Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha, pela orientação, amizade e principalmente por ter acreditado no meu trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli, pelas contribuições ao trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Geoprocessamento (FEAGRI/UNICAMP) Agmon Moreira Rocha pela amizade, pelos momentos de descontração e disponibilidade para ajudar sempre.

Ao pesquisador Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo e ao Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, pela participação na banca de qualificação e pelas sugestões que contribuíram para a melhoria do trabalho.

Ao meu ex-orientador de Graduação, Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho e ao meu ex-orientador de Mestrado, Prof. Dr. Gilberto Chohaku Sedyama, que proporcionaram o início da minha carreira científica.

Aos meus amigos e colegas do laboratório, Jerry Johann, Michelle Picoli, Gleyce Dantas, Pedro Soares, Diego Rocha, Daniela Silva, Christiano Arraes, Daniel Duft, Henrique Ordones, Rafael Bispo, Maria Petrini, Victor, pelos momentos de descontração e sempre solidários a qualquer ajuda.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”

Albert Einstein

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

O levantamento subjetivo para a estimativa da produção agrícola, baseado em entrevistas, ainda prevalece no Brasil, com consequências em sua exatidão. Dada a sua importância para o planejamento de políticas públicas e preços de mercado, o monitoramento de áreas agrícolas e estimativas da produtividade com o uso de geotecnologias e dados espectrais e meteorológicos, pode contribuir significativamente para estimativas mais precisas e de menor custo. O estado de São Paulo é o maior produtor de etanol e açúcar de cana-de-açúcar do Brasil, assim, é de extrema importância a identificação de áreas de cana-de-açúcar e suas fases de cultivo de forma temporal e espacial. Além disso, o conhecimento da influência das condições do tempo permite tanto o monitoramento da produção como a aplicação de modelos de estimativa de produtividade. Neste trabalho foram utilizados dados presentes no produto MOD13Q1 do sensor MODIS, sendo NDVI, para identificação e monitoramento, qualidade (VI Quality) e confiabilidade (Reliability), aplicadas para a eliminação de pixels falhos nas imagens de NDVI. Estes foram utilizados para mapear áreas cujo perfil temporal se assemelhasse ao de cultivo de cana-de-açúcar, além de identificar as fases de pico do ciclo vegetativo, colheita, final da colheita e desenvolvimento. Os resultados mostraram que a metodologia foi capaz de identificar perfis característicos de cana-de-açúcar e suas respectivas fases de cultivo. Foram utilizados também dados meteorológicos do modelo global ECMWF para a determinação do total acumulado de precipitação, radiação global, evapotranspiração de referência e graus dias entre as fases de crescimento e colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e a estimativa da produtividade. Primeiramente, foi feita a verificação da precisão e acurácia do modelo atmosférico ECMWF pela comparação de dados decendiais simulados de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar aos observados por mapas interpolados de estações meteorológicas do estado de São Paulo no período entre 2005 e 2010. Como resultado, observou-se que o modelo ECMWF simula satisfatoriamente, sendo a maior parte dos resultados com $R^2 > 0,60$; $d > 0,7$; $RMSE < 5^\circ\text{C}$ e $< 50\text{mm}$; $Es < 5^\circ\text{C}$ e $< 24\text{mm}$. Após a verificação, os acumulados foram apresentados em formato de mapa temático na resolução espacial do sensor MODIS de 250 metros. A análise dos resultados mostrou que foi possível identificar a variabilidade espacial das variáveis climáticas e sua relação com a realidade apresentada por órgãos oficiais. Foi utilizada a metodologia da Zoneamento Agroecológico (ZAE) para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar nos

períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010. O modelo foi adaptado para a estimativa da produtividade potencial, estimada e o déficit hídrico. Os resultados foram comparados com dados oficiais divulgados pelo órgão IBGE na escala de município e apresentaram relativa eficácia, sendo grande parte com uma superestimativa entre 0 e 25 mil quilogramas por hectare. Foi possível também a geração de mapas de déficit hídrico no Estado de São Paulo para cada período, destacando assim áreas com queda na produtividade.

Palavras Chave: perfil temporal; Modis; ECMWF; produtividade.

ABSTRACT

Subjective methods are normally used in Brazil to estimate agricultural production. These are based on interviews and therefore limited in terms of statistical evaluations and accuracy estimates of the results. This information is important for public and private planning. Agricultural monitoring and yield estimates using remote sensing and geotechnologies and weather data can contribute significantly for more accurate estimates with lower costs. Sao Paulo state is the largest producer of ethanol and sugarcane in Brazil, thus, it is extremely important to identify areas of sugarcane cultivation and detect the phenological phases, both spatial and temporally. Furthermore, knowledge of the influence of weather conditions allows production monitoring and the application of yield estimation models. NDVI images were used, for identification and monitoring of sugarcane. Quality and Reliability images were used for the elimination of contaminated pixels in NDVI images. These were used to map areas whose temporal profile resembled the sugarcane cultivation behavior, besides to identify the phases of peak of growth cycle (maximum vegetation biomass), harvest, end of harvesting and development of sugarcane. The results showed that the methodology was able to identify the characteristic profile of sugarcane and their respective stages of cultivation. Meteorological data from the ECMWF global model were also used for determining the total cumulated rainfall, global radiation, reference evapotranspiration and degree days between growth and harvesting phases of sugar cane in Sao Paulo and yield estimation. Previously a verification of accuracy and precision of the ECMWF was carried out by comparing 10-day period precipitation, maximum and minimum air temperature simulated with interpolated maps from 33 weather stations in Sao Paulo state between 2005 and 2010, generating statistical maps pixel by pixel. Statistical indexes showed to be satisfactory (most of the results with $R^2 > 0.60$, $d > 0.7$, $RMSE < 5^\circ\text{C}$ and $< 50\text{ mm}$; $E_s < 5^\circ\text{C}$ and $< 24\text{ mm}$) in the period studied and ECMWF model can be recommended for use in the Sao Paulo state. After verification, the periods accumulated were presented in map format using MODIS spatial resolution of 250 meters. The results showed the spatial variability of climate variables and the relationship to the reality presented by official data. For sugarcane yield estimate the Agroecological Zone (ZAE) methodology was used in the periods of 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 and 2009/2010. The estimation of potential yield and water deficit were adapted to the model. The results were compared with official data released by IBGE at

municipality scale and presented relative effectiveness, being largely an overestimate between 0 and 25,000 kg per hectare. It was possible to create maps of water deficit in the Sao Paulo state for each period, highlighting sugarcane yield reducing areas.

Key-words: temporal profile; Modis; ECMWF; yield.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral.....	3
1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Organização da Tese	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. A cana-de-açúcar no Brasil e no Mundo.....	5
2.1.1. Características da cana-de-açúcar.....	5
2.2. Sistema atual de monitoramento e estimativa de safras no Brasil	10
2.3. O sensoriamento remoto aplicado à agricultura.....	11
2.3.1. Resolução espacial e temporal de sistemas sensores.....	12
2.3.2. Comportamento espectral da vegetação	13
2.3.3. Índices de Vegetação	15
2.3.4. O sensor MODIS	17
2.3.5. Séries multi-temporais	19
2.4. Modelagem Agrometeorológica	20
2.4.1. O modelo ECMWF.....	22
2.5. O uso de sensoriamento remoto e agrometeorologia no monitoramento da cana-de-açúcar	24
3. METODOLOGIA GERAL	27
3.1. Área e período de estudo.....	27
3.2. Fluxograma Geral da Tese	27
3.3. Dados espectrais: sistema MODIS.....	29
3.4. Dados agrometeorológicos de superfície e do modelo do ECMWF.....	31
4. RESULTADOS	32

4.1. Artigo 1: Identificação de áreas e fases de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	32
4.1.1. Introdução	33
4.1.2. Material e Métodos	34
4.1.3. Resultados e Discussão	41
4.1.4. Conclusões	50
4.1.5. Referências	51
4.2. Artigo 2: Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o estado de São Paulo	54
4.2.1. Introdução	55
4.2.2. Material e Métodos	56
4.2.3. Resultados e Discussão	60
4.2.4 Conclusões	65
4.2.5 Referências	66
4.3. Artigo 3: Determinação do total acumulado de precipitação, radiação global, evapotranspiração de referência e graus-dias oriundos do ECMWF entre as fases de crescimento e colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.....	68
4.3.1. Introdução	69
4.3.2. Material e Métodos	70
4.3.3 Resultados e Discussão	74
4.3.4. Conclusões	81
4.3.5. Referências	81
4.4. Artigo 4: Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	84
4.4.1. Introdução	85
4.4.2. Material e Métodos	86
4.4.3. Resultados e Discussão	94
4.4.4. Conclusões	99
4.4.5. Referências	100
5. CONCLUSÕES GERAIS	102
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Produção cana-de-açúcar no mundo em 2010 (FAOSTATS, adaptado 2012).....	5
Figura 2.2. Ciclo de uma cultura de cana-de-açúcar com três cortes. Fonte: Rodrigues (1995). 7	
Figura 2.3. Dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar para cana ano (CA) e cana ano-e-meio (CAM). Fonte: Adaptado de Rodrigues (1995).....	8
Figura 2.4. Temperatura e precipitação média para o município de Morro Agudo-SP. Fonte: Adaptado de CEPAGRI (2008).....	9
Figura 2.5. Porcentagem de utilização de tipos de variedades de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil em 132 unidades (2.974.561 hectares). Fonte: PMGCA (2010).	10
Figura 2.6. Comportamento espectral de uma folha verde sadia. Fonte: Adaptado de Jensen, (2009).	14
Figura 2.7. Representação esquemática da evolução da reflectância de uma cobertura vegetal ao longo das fases de crescimento e senescência: Fonte: Adaptado de Guyot, (1989) apud Esquerdo, (2007).....	15
Figura 2.8. Representação do Tile h11v10 de 1200 x 1200km.....	18
Figura 2.9. Representação dos Tiles da América do Sul.....	18
Figura 3.1. Localização da área de estudo no Brasil.....	27
Figura 3.2. Fluxograma geral das principais etapas do trabalho desenvolvido.....	28
Figura 4.1.1. Fluxograma das etapas do trabalho.....	36
Figura 4.1.2. Comportamento do perfil de NDVI suavizado e transformado em coeficiente angular destacando nos quadros preto e cinza os dados utilizados e os pontos pretos e cinza os respectivos resultados, sendo que a execução é aplicada para todo perfil.	38
Figura 4.1.3. Comportamento do perfil de coeficiente angular e transformado em perfil de variância destacando nos quadros preto e cinza os dados utilizados e os pontos pretos e cinza os respectivos resultados, sendo que a execução é aplicada para todo perfil.	38

Figura 4.1.4. Características do perfil temporal de NDVI da cana-de-açúcar identificadas no perfil temporal de coeficiente angular, sendo os círculos representando as datas das fases de cultivo.....	41
Figura 4.1.5. Máscara de cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	42
Figura 4.1.6. Máscara da fase de cultivo Pico vegetativo da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.....	45
Figura 4.1.7. Máscara da fase de cultivo Colheita da cana-de-açúcar para as safras as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.....	46
Figura 4.1.8. Máscara da fase de cultivo Fim da Colheita da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.....	47
Figura 4.1.9. Máscara da fase de cultivo Crescimento/Desenvolvimento da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	48
Figura 4.1.10. Comparação dos dados municipais no Estado de São Paulo da área de cana-de-açúcar estimada em relação aos dados do IBGE nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e em relação ao Canasat no ano de 2009/2010; juntamente com o coeficiente de determinação (R^2) e índice d de Willmott.	49
Figura 4.1.11. Diferença dos dados municipais no Estado de São Paulo da área de cana-de-açúcar estimada em relação aos dados do IBGE nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e em relação ao Canasat no ano de 2009/2010, sendo os municípios dispostos em ordem decrescente em relação à área dada como referência.	50
Figura 4.2.1. Distribuição das estações utilizadas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) no estado de São Paulo.....	57
Figura 4.2.2. Fluxograma do trabalho.	58
Figura 4.2.3. Pontos de dados utilizados do modelo ECMWF sobre o Estado de São Paulo...	59

Figura 4.2.4. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de precipitação do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.	61
Figura 4.2.5. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de temperatura do ar mínima do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.....	64
Figura 4.2.6. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de temperatura do ar máxima do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.....	65
Figura 4.3.1. Fluxograma do trabalho.	72
Figura 4.3.2. Total acumulado para a precipitação nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	75
Figura 4.3.3. Total acumulado para a evapotranspiração de referência nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	76
Figura 4.3.4. Total acumulado para a radiação global nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	77
Figura 4.3.5. Total acumulado de dias nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	79
Figura 4.3.6. Total calculado de graus-dias nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.	80
Figura 4.4.1. Fluxograma das etapas para a estimativa produtividade potencial a partir do modelo de Doorenbus e Kassan (1979).....	89

Figura 4.4.2. Fluxograma das etapas para a estimativa da razão da ETr em relação a ETc e da penalização da produtividade potencial para obtenção da produtividade estimada.	92
Figura 4.4.3. Imagem Penalização referente à disponibilidade hídrica aplicada à produtividade potencial estimada para os períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.	95
Figura 4.4.4. Produtividade potencial média para os municípios cuja área engloba 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.	96
Figura 4.4.5. Diferença entre a produtividade potencial estimada e a produtividade dada pelo IBGE para os municípios com rendimento (segundo o IBGE) maiores que zero para a cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resolução espacial e temporal de alguns sistemas sensores.	12
Tabela 3.1. Descrição da Imagem <i>Pixel Reliability</i> do produto MOD13Q1.....	30
Tabela 3.2. Descrição da imagem <i>VI Quality</i> do produto MOD13Q1.....	30
Tabela 4.1.1. Comparação da área total de cana-de-açúcar colhida no Estado de São Paulo considerando dados do IBGE e Canasat em relação à estimativa obtida pela metodologia e a diferença entre dados do IBGE e Canasat.	43
Tabela 4.4.1. Valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios com rendimento (segundo o IBGE) maiores que zero para a cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.	98
Tabela 4.4.2. Valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios que representam 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.....	99

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a procura por alternativas para diminuição da emissão de gases do efeito estufa, encontrou no etanol, oriundo da cana-de-açúcar, uma solução sustentável. O Brasil é o maior produtor de etanol e açúcar de cana-de-açúcar do mundo e ocupa posição de liderança na tecnologia de sua produção (Goldemberg, 2007). Além disso, com a criação de veículos bicom bustíveis no Brasil, houve um aumento da demanda de etanol e assim a necessidade de uma maior produção.

Segundo a UNICA (2010), o estado de São Paulo responde por aproximadamente 60% da produção de cana-de-açúcar no país, seguido de Paraná, Minas Gerais e Alagoas com mais de 5% cada. Sendo assim, 85% da cana-de-açúcar é produzida na região centro-sul e 15% na região nordeste do Brasil. Na região centro-sul a área plantada na safra 2008/2009 chegou a 6,53 milhões hectares (ha), representando um aumento de 15,7 % (917,9 mil ha) em relação à safra anterior.

No Brasil prevalece o levantamento subjetivo para previsão de safra. Estes se baseiam em entrevistas com pessoas ligadas à área agrícola do setor como agentes rurais, gerentes de banco e fornecedores de insumos e equipamentos agrícolas (IBGE, 2002). Posteriormente, estes dados são agrupados em nível estadual e nacional, sendo que estes dados não permitem avaliações estatísticas e nem a estimativa da precisão dos resultados [Collares et al., (1993); Neves et al., (2006)].

Sendo a estimativa da produção um dos dados mais importantes para planejamento no setor público e para a iniciativa privada, o monitoramento de áreas agrícolas e estimativas da produtividade com o uso de sensoriamento remoto e geotecnologias pode contribuir significativamente para se obter metodologias eficazes e de baixo custo, especialmente no Brasil, que possui grande extensão territorial.

Uma das formas para o levantamento da área cultivada é a aplicação de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto e, também, pelo uso da amostragem estratificada em associação com dados orbitais (Assad et al., 2007). O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um sensor a bordo do satélite *Terra* (EOS AM) e *Aqua* (EOS PM) adequado ao monitoramento de coberturas vegetais. As imagens deste sensor de baixa resolução espacial (250 metros) e alta resolução temporal (1 a 2 dias) são disponibilizadas

gratuitamente, tendo como um de seus produtos imagens de índices de vegetação (NDVI e EVI) (Modis, 2010).

Vários autores identificaram que é possível monitorar de forma eficiente a vegetação por meio da análise multi-temporal de imagens de NDVI do sensor MODIS (Xiao et al., 2005; Zhang et al., 2006; Biggs et al., 2006; Chen et al., 2009). Segundo Xavier et al., (2006), o mapeamento da cana-de-açúcar a partir de imagens Modis é adequado para identificar e monitorar áreas com cana-de-açúcar, baseadas em análises de imagens multi-temporal. Aguiar (2008) mostra que é possível tanto a identificação da área quanto da data colheita da cana-de-açúcar através de imagens NDVI do sensor Modis.

A variabilidade da produção agrícola é afetada principalmente pelas condições climáticas. Dentre os elementos climáticos, a temperatura, a radiação solar e a quantidade de chuva são determinantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (Marin et al., 2008). Dessa forma, o conhecimento da variabilidade destas variáveis durante o período de cultivo da cultura, associado a modelos agrometeorológicos de rendimento, permite análises da redução da produtividade (Pereira et al., 2002).

A utilização de modelos agrometeorológicos de rendimento necessita de dados meteorológicos, que geralmente são provenientes de estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Porém, com frequência, esses dados podem apresentar erros ou serem de difícil acesso. Assim, dados agrometeorológicos provenientes de modelos globais como o ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) podem vir a ser uma alternativa. Estes são disponibilizados gratuitamente pelo banco de dados meteorológicos do Joint Research Centre (JRC), centro de pesquisas da Comissão Europeia onde coleta informações meteorológicas de estações espalhadas por todo mundo, radares meteorológicos, satélites entre outras fontes (Person e Grazziani, 2007).

A estimativa do rendimento da cana-de-açúcar pode ser feita baseada em modelos que utilizam dados agrometeorológicos e espectrais (Doorenbus e Kassan, 1979; Rudorff et al., 1990; Simões et al., 2005; Oliveira et al., 2012). Dentre os vários modelos de produtividade, o Método do Zoneamento Agroecológico (ZAE) apresentado em Doorenbus e Kassan (1979) e Fischer et al., (2002), exige poucos dados de entrada e apresenta resultados próximos da realidade. Vários autores já constataram a eficiência do modelo em várias aplicações (Deng et al., 2006 ; Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2012).

Assim, nesse contexto, temos como hipótese de que é possível a identificação e monitoramento da cultura da cana-de-açúcar através de perfis temporais de NDVI do sensor Modis e a estimativa do rendimento destes pixels identificados, através do modelo ZAE com dados do ECMWF no estado de São Paulo.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver uma metodologia para identificar e mapear a dinâmica das áreas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo e estimar sua produtividade através de um modelo agrometeorológico vinculado a dados espectrais.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar e mapear, através de perfis temporais de imagens de NDVI do sensor Modis na escala de pixel, áreas com comportamento de cultivo de cana-de-açúcar e suas respectivas fases de cultivo (crescimento/desenvolvimento; pico vegetativo; colheita; fim da colheita) no estado de São Paulo nos períodos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010;
- Confrontar a área estimada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo pela metodologia desenvolvida com dados do IBGE em escala municipal;
- Comparar dados de precipitação pluvial, temperatura do ar máxima e mínima de estações de superfície de com o modelo ECMWF no estado de São Paulo;
- Gerar mapas do total de precipitação pluvial, evapotranspiração de referência, radiação global, comprimento do período em dias e graus dias para cana-de-açúcar entre as fases de cultivo crescimento/desenvolvimento e colheita, na escala de pixel do sensor Modis (250 metros), confrontando com informações científicas e oficiais;
- Criar uma metodologia para a identificação de déficit hídrico na escala de pixel com dados do ECMWF;
- Adaptar a metodologia ZAE para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo com dados do ECMWF e máscaras de fases de cultivo crescimento/desenvolvimento e colheita, na escala de pixel do sensor Modis (250 metros).

1.3 Organização da Tese

O trabalho foi organizado a partir de quatro artigos científicos resultantes do projeto de pesquisa desenvolvido como tese de doutorado.

A primeira parte trata da introdução, objetivo geral e objetivos específicos. A segunda parte aborda a revisão bibliográfica e a metodologia geral utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Os resultados são apresentados na forma de quatro capítulos, onde cada um corresponde a um artigo científico, contendo Resumo, Palavras-Chave, Abstract, Key-words, Introdução, Material e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões e Referências.

O artigo 1 trata da identificação de áreas e fases de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

O artigo 2 trata da avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o Estado de São Paulo.

O artigo 3 trata da determinação do total acumulado de precipitação, radiação global, evapotranspiração de referência e graus dias oriundos do ECMWF entre as fases de crescimento e colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

O artigo 4 trata da estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Ao final é apresentado um capítulo de “Conclusões Gerais” sobre toda a tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cana-de-açúcar no Brasil e no Mundo

Atualmente, o Brasil é responsável por aproximadamente 42% da produção de cana-de-açúcar no mundo, que somado com a produção de Índia, China, Tailândia, Paquistão, México, Colômbia e Austrália são 80% do total (Figura 2.1).

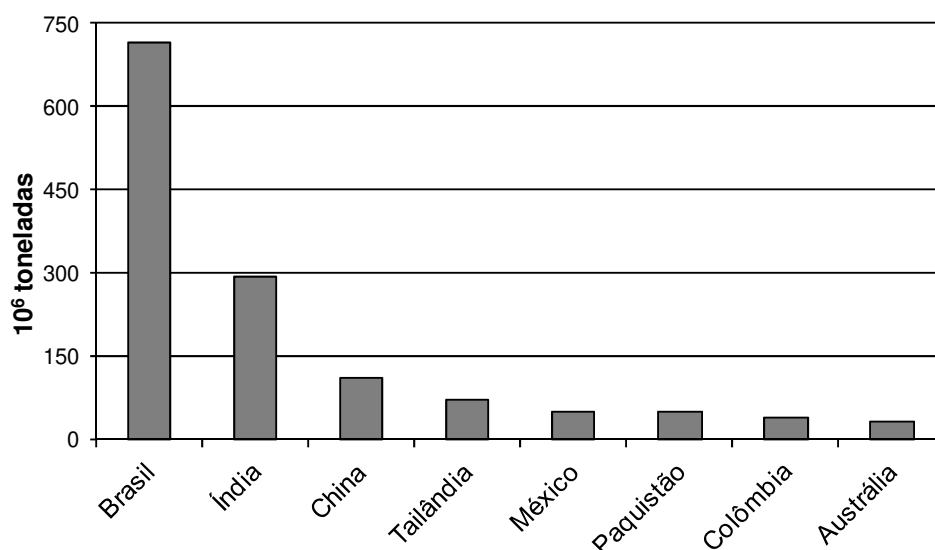


Figura 2.1. Produção cana-de-açúcar no mundo em 2010 (FAOSTATS, adaptado 2012).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2010 foram colhidas no Brasil 717,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. No estado de São Paulo foram colhidas 426,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, aproximadamente 60% do total no Brasil.

2.1.1. Características da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea pertencente ao gênero *Saccharum officinarum* L. originária da Ásia, provavelmente da Nova Guiné. É cultivada preferencialmente entre os paralelos 35° norte e sul. A cultura se desenvolve sobre uma longa estação quente no período

de crescimento, com alta incidência de radiação e umidade no solo adequados, seguidos por uma estação seca, com alta luminosidade e razoavelmente fria, porém livre de gelo, para a maturação e colheita (Doorenbos e Kassan, 1979).

Rodrigues (1995) afirmou que sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C₄, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora. Entretanto, esta alta atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar para a produção de matéria orgânica está na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Área Foliar (IAF), sendo este um dos mais importantes parâmetros agronômicos na análise de crescimento.

A temperatura ótima para a germinação das raízes da cana-de-açúcar após o plantio é entre 32 a 38°C. Durante o crescimento, o ideal é uma temperatura média diária entre 22 e 30°C e mínima de aproximadamente 20°C. Para a fase de amadurecimento, temperaturas entre 10 e 20°C são ideais para a diminuição da parte vegetativa e um aumento no acúmulo de açúcares no colmo. Possui necessidade hídrica entre 1500 e 2500 milímetros, distribuídos igualmente durante o ciclo de cultivo (Doorenbos e Kassan, 1979).

O ciclo agrícola se estende desde o plantio da cana-de-açúcar até o último ciclo safra, ou cana soca, no qual ocorre manejo da terra (com a extração dos rizomas e raízes). O manejo indicado é, normalmente, a rotação de culturas por 1 ou 2 anos, porém atualmente outras técnicas de conservação do solos estão sendo difundidas. O número de ciclos safra é determinado pela queda gradativa da produtividade que depende das condições meteorológicas durante o período, das condições do solo e da variedade. A média na indústria sucroalcooleira é de 5 ciclos safras para se realizar a reforma (Godoy, 2007).

O ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar (Figura 2.2) pode ser dividido em quatro fases: estabelecimento da cultura com emissão de raízes e folhas (plantio), brotação e perfilhamento com alongamento do caule, formação da produção e maturação.

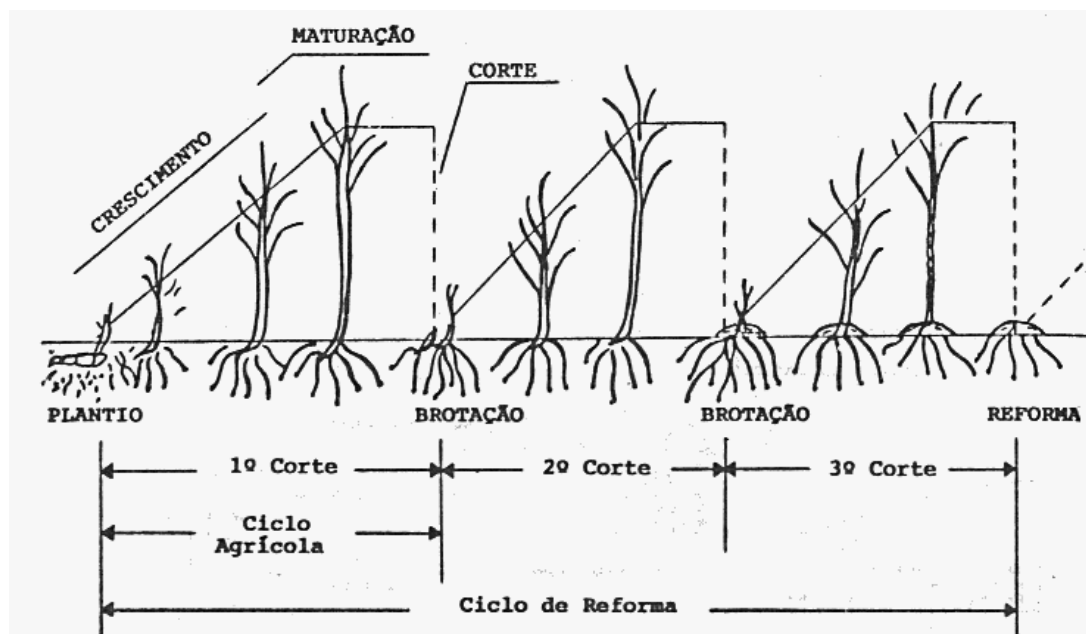


Figura 2.2. Ciclo de uma cultura de cana-de-açúcar com três cortes. Fonte: Rodrigues (1995).

Após o plantio, o período de estabelecimento e emissão das folhas, é necessária a presença de água e luz. Durante o período vegetativo a brotação é diretamente proporcional à frequência de chuvas ou irrigação. Na fase de alongamento do caule e da formação pra produção, é essencial que a disponibilidade e o volume de água seja maior. Na maturação da cana-de-açúcar, a taxa vegetativa deve ser diminuída, e para tal, é necessária a redução na irrigação ou um período de menor ocorrência de chuvas. Assim, com a desidratação da cana-de-açúcar, há uma maior taxa de conversão de açúcares em sacarose (Doorenbos e Kassan, 1979).

Segundo Rodrigues (1995), de modo a adaptar o ciclo da cana-de-açúcar para a região centro sul do Brasil, a cana é plantada em duas épocas: no verão e na primavera. A cana plantada no verão terá crescimento até o final do outono, sendo no inverno crescimento praticamente nulo, voltando a se desenvolver no início da primavera, quando as condições climáticas se tornarem favoráveis – calor e umidade. Esta, conhecida como cana de ano e meio, será colhida apenas a partir do mês de maio do próximo ano, referente ao plantio. Após a primeira colheita, esta será chamada de cana de ano ou cana soca. Para a cana de ano ou cana soca, plantada em outubro/novembro, o crescimento se dará logo nos primeiros meses, para a

partir de maio se submeter gradualmente a condições pouco favoráveis de chuva e temperatura, onde irá ocorrer o amadurecimento.

Portanto, o ciclo da cana-de-açúcar é semi-perene e começa com o plantio de um corte da haste que cresce cerca de 12 meses (cana de ano) ou 18 meses (cana de ano e meio). Após a primeira colheita, a cana é chamada de cana soca e são colhidas anualmente por um período de cerca de 5-7 anos ou mais. Sucessivas safras levam a uma perda gradual de rendimento até que a colheita não é mais economicamente viável. Neste ponto, o ciclo é interrompido, e a área é renovada com a reforma da área, ou com o plantio de novas estacas ou com rotação de culturas (Rudorff et al., 2010). Se em algum ano a cana não for colhida, ela vai continuar a crescer para ser colhida no ano seguinte, sendo chamada de cana bisada.

Na Figura 2.3 é apresentada a dinâmica de cultivo para a região centro sul do Brasil, para uma dada safra, como exemplo 2009/2010.

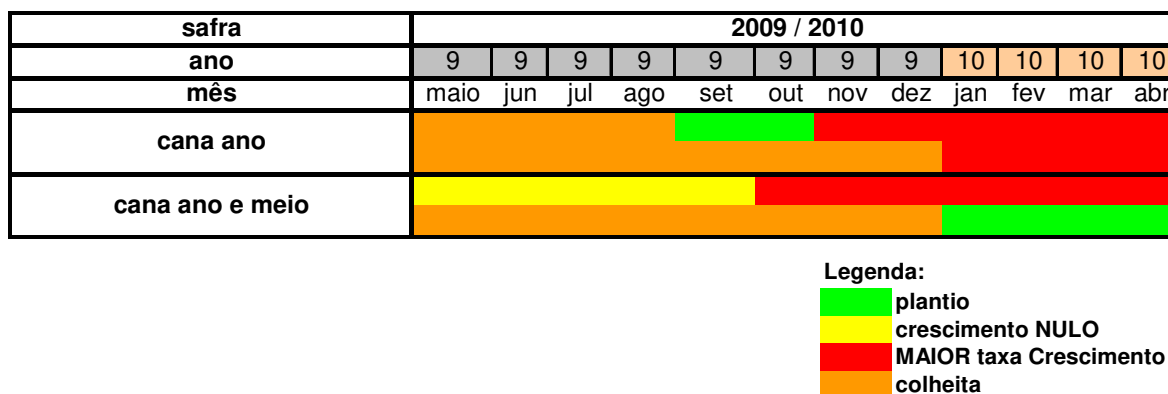


Figura 2.3. Dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar para cana ano (CA) e cana ano-e-meio (CAM). Fonte: Adaptado de Rodrigues (1995).

Conforme citado anteriormente, cada fase fenológica da cana-de-açúcar possui uma necessidade ideal para que a produção seja adequada e rentável. De forma a ilustrar estas condições, é apresentada na Figura 2.4 a variação anual da temperatura e da precipitação do município de Morro Agudo, São Paulo. Este, sendo o município com maior área plantada e produtividade de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, localizado na região pólo sucroalcooleira, apresenta condições ideais de cultivo. Isso se deve ao fato de que a

precipitação e as temperaturas médias (final da primavera / verão / início do outono) são ideais para o período vegetativo da cultura. Além disso, a queda na precipitação e na temperatura no inverno favorece o amadurecimento e a colheita.

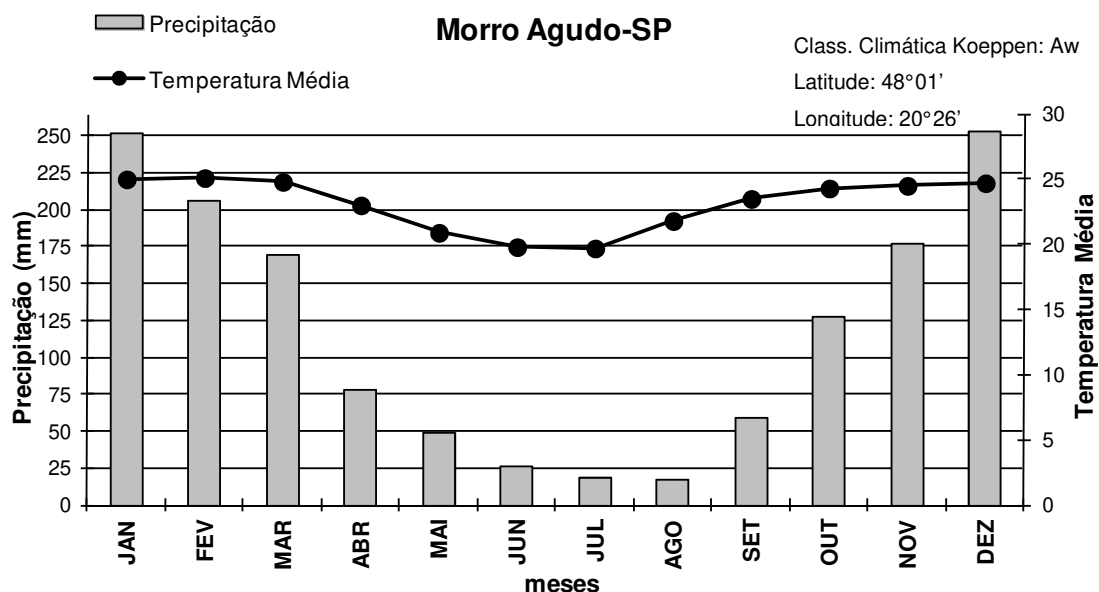


Figura 2.4. Temperatura e precipitação média para o município de Morro Agudo-SP. Fonte: Adaptado de CEPAGRI (2008).

As características varietais definem o número de colmos por planta, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, sendo a expressão destes caracteres muito influenciados pelo clima, pelo manejo e pelas práticas culturais utilizadas (Rodrigues, 1995). Além disso, é possível trabalhar com características fenológicas como época de colheita, produção agrícola (baixa/média/alta), brotamento, tipo de colheita, perfilhamento, tombamento, florescimento, resistência a doenças, etc (PMGCA, 2010). Na Figura 2.5 temos a porcentagem de utilização de tipos de variedades de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil, considerando 132 unidades de produção.

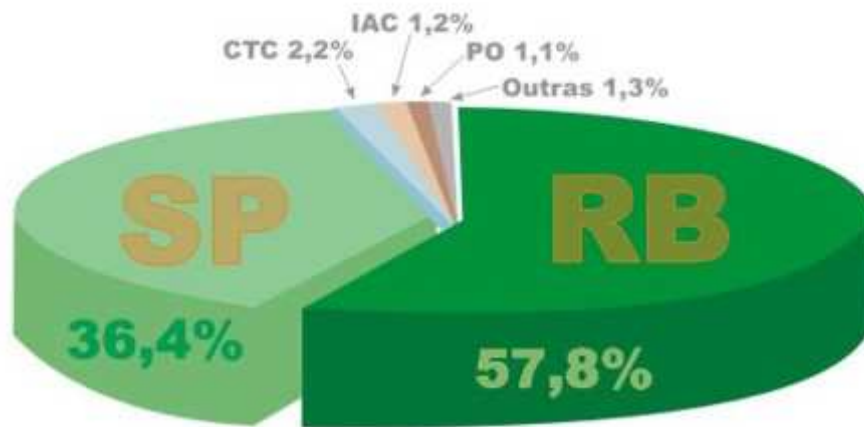


Figura 2.5. Porcentagem de utilização de tipos de variedades de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil em 132 unidades (2.974.561 hectares). Fonte: PMGCA (2010).

2.2. Sistema atual de monitoramento e estimativa de safras no Brasil

Os órgãos oficiais responsáveis pelas informações sobre a safra brasileira são o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Tanto o IBGE como a CONAB, realizam levantamentos da produção agrícola, com dados obtidos de forma subjetiva, através de consulta a especialistas, instituições, por município ou região, e também por censo agropecuário, com informação colhida através de entrevistas, por estabelecimento rural. Assim, ambos se baseiam em coleta de dados subjetivos (Neves e Luiz, 2006; IBGE, 2002; CONAB, 2012a).

A estimativa da produção é um dos dados mais importantes para planejamento no setor público e para a iniciativa privada. Para o setor público, saber a distribuição no espaço geográfico das culturas e a estimativa de safra ajudam o governo a melhorar as ações nas políticas públicas no setor agrícola. Desse modo o governo pode planejar com maior segurança as atividades que envolvem a cadeia produtiva, desde o produtor até o consumidor final. Para a iniciativa privada os benefícios permeiam todo o ambiente do agronegócio: setor produtivo, armazenagem, estoques, transporte, industrialização, comercialização, exportação e importação.

A CONAB possui atualmente dois projetos, Projeto Geosafras e o Projeto SigaBrasil, que utilizam da geotecnologia para atividades de previsão de safras, mapeamento da rede armazenadora nacional e das usinas de açúcar e álcool, logística de escoamento e localização de estoques, entre outros serviços relacionados com as competências e atribuições da companhia. Iniciado em 2004, o “Projeto de Aperfeiçoamento Metodológico do Sistema de Previsão de Safras no Brasil” (GeoSafras) visa além do mapeamento das áreas cultivadas, divulgar informes e boletins agroclimáticos, agrometeorológicos e espectrais, que têm servido como indicativos de produtividade e têm dado maior credibilidade às estimativas de safra da CONAB. Esses produtos também servem para prevenir o produtor quanto aos possíveis riscos decorrentes de intempéries climáticas, e/ou indicar momentos mais favoráveis ao plantio e demais tratos culturais. Já o SigaBrasil, realiza o mapeamento de diversas informações do setor agropecuário, relacionando-as com parâmetros econômicos e ambientais. A análise dos mapas temáticos e das figuras geradas em sistemas de informação geográfica possibilita um melhor entendimento da estrutura da cadeia produtiva e facilita o estudo dos sistemas de logística, além da interpretação dos possíveis impactos das atividades agropecuárias ao meio ambiente (CONAB, 2012b).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do projeto Canasat, monitora o cultivo da cana-de-açúcar desde 2003 no Estado de São Paulo e desde 2005 para os demais estados produtores de cana da região centro-sul. Este utiliza imagens dos satélites LANDSAT-5 e CBERS-2B onde, através da vetorização manual, identifica e mapeia visualmente áreas cultivadas com cana-de-açúcar, gerando a cada ano safra, mapas temáticos com a distribuição espacial da cana (CANASAT, 2010). Porém, não há disponível a acurácia dos mapas gerados por este projeto, além de depender de intérpretes treinados.

2.3. O sensoriamento remoto aplicado à agricultura

A utilização de dados de imagens de satélite é de grande valor no monitoramento da vegetação, pois propiciam o acompanhamento de grandes áreas de forma remota. Os avanços tecnológicos de sensores remotos permitem analisar, através de imagens de satélites, a distribuição espacial de áreas cultivadas, as possíveis modificações da cobertura vegetal em diversas épocas, possibilitando o monitoramento das áreas vegetadas (Lira et al., 2009). A

seguir são apresentados as principais características que permitem tanto o mapeamento como a determinação do vigor vegetativo utilizando-se a tecnologia do sensoriamento remoto.

2.3.1. Resolução espacial e temporal de sistemas sensores

A resolução espacial é definida como a capacidade do sistema sensor em identificar objetos na superfície terrestre, refere-se ao tamanho do pixel da imagem gerada. Já a resolução temporal está relacionada com a repetitividade de observação do sensor numa mesma área, ou seja, o intervalo temporal entre revisitas (Jensen, 2009).

Em estudos onde o objetivo é monitorar culturas agrícolas, sensores de alta resolução temporal são recomendados, principalmente pelo fato de que aumentando a periodicidade das imagens, o monitoramento pode revelar problemas como doenças e estresses hídricos, além de aumentar a possibilidade de obter imagens livres de nuvens. A Tabela 2.1 apresenta a resolução temporal e espacial de alguns sistemas sensores comumente utilizados em estudos de sensoriamento remoto aplicados na agricultura.

Tabela 2.1. Resolução espacial e temporal de alguns sistemas sensores.

Satélite	Sensor	Resolução Espacial	Resolução Temporal
NOAA	AVHRR	1,1 km	12 horas
SPOT	Vegetation	1,0 km	24 horas
Terra / Aqua	MODIS	250m, 500m, 1,0 km	1 ou 2 dias
Landsat 5	TM	30 m	16 dias
CBERS 2	CCD	20 m	26 dias

Rudorff et al. (2007b) e D'Arco et al. (2007) utilizando o sensor MODIS para estimativa de área plantada para soja e arroz no Rio Grande do Sul, concluíram que apesar da resolução espacial de 250 metros, é possível identificar as áreas. Porém, alvos com alta confusão, ou seja, com diferentes culturas podem dificultar a classificação.

2.3.2. Comportamento espectral da vegetação

As propriedades de reflectância e transmitância das folhas foram apresentadas em trabalhos iniciais de Gates et al. (1965), Gausmann et al. (1969), Wooley, (1971), mostrando como a estrutura e os pigmentos das folhas afetam ângulos da luz, faixa do espectro eletromagnético, etc.

Das três componentes resultantes do fracionamento da radiação solar incidente, ao interagir com a planta, isto é reflexão, absorção e transmissão, percebe-se que a mais importante do ponto de vista fisiológico e bioquímico para a produtividade da planta é, sem dúvida, a absorção. Entretanto, para a grande maioria dos sistemas de sensoriamento remoto, principalmente, os orbitais e os suborbitais, medir esta parte da radiação é impossível, a não ser por meio de inferências baseadas no comportamento das quantidades refletidas e/ou emitidas pela vegetação. Neste aspecto, a energia refletida pela vegetação tem sido a mais utilizada, porque é nesta faixa do espectro eletromagnético que se dispõe da maior quantidade de sensores orbitais e suborbitais capazes de registrar informações da superfície terrestre (Moreira, 2007).

Os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas são: pigmentos, quantidade de água e estrutura celular. Conforme a Figura 2.6 verifica-se que no visível a absorção de energia ocorre devido à presença dos pigmentos, como a clorofila a e b, principalmente na faixa do vermelho e azul. Na faixa do vermelho há uma maior absorção caso haja a presença de antocianina e β -caroteno.

No infravermelho próximo, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é dominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas. Estas estruturas, localizadas na parte mais interna da folha, chamada de mesófilo, possuem células com vacúolo e paredes hidratadas onde aumentam a reflexão propiciando melhor absorção da radiação pelos pigmentos (Moreira, 2007). No infravermelho médio, a reflectância da vegetação caracteriza-se por um decréscimo dos valores da energia refletida, afetada principalmente pelo conteúdo de água foliar.

Na Figura 2.7, temos as curvas do comportamento espectral do solo (linha cheia) e da vegetação (linha pontilhada). Estas curvas se inter-relacionam onde as setas cheias indicam o

crescimento da vegetação em um solo antes exposto. Já a seta pontilhada indica o processo de senescência da planta, voltando assim a ter característica espectral de solo exposto.

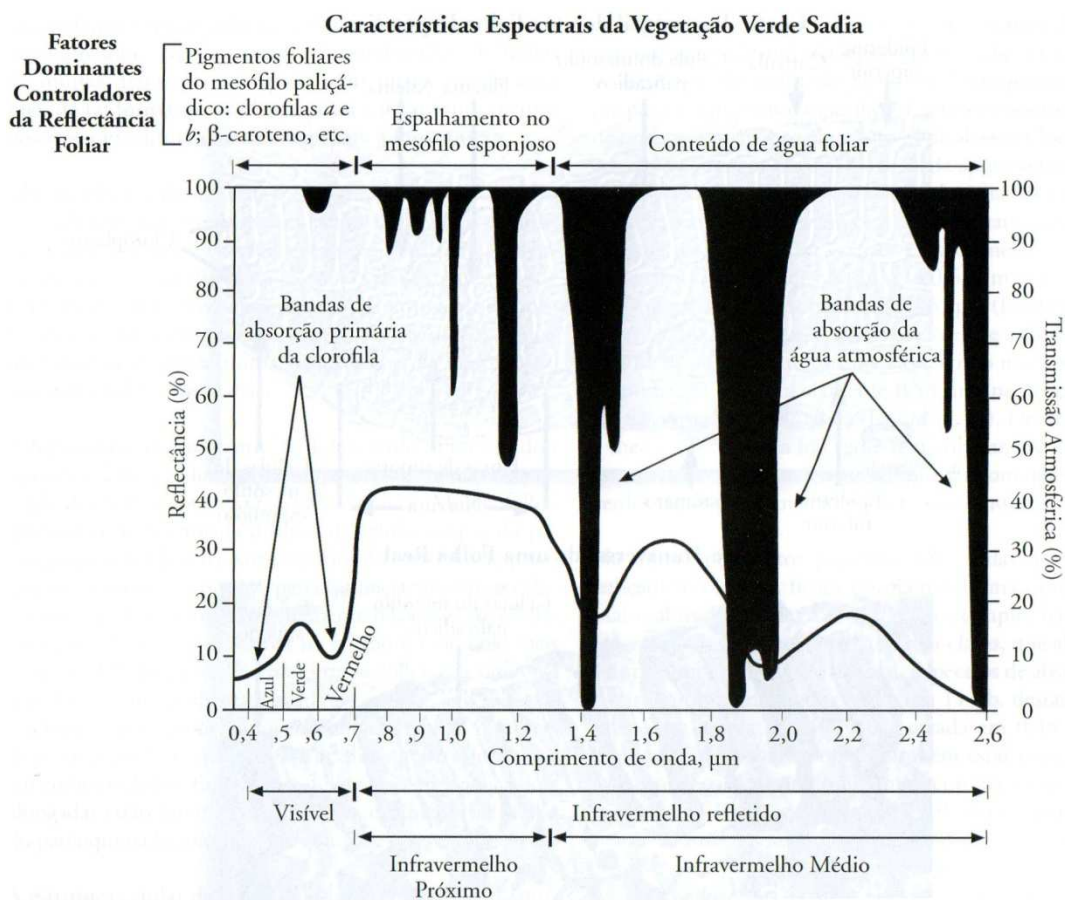


Figura 2.6. Comportamento espectral de uma folha verde sadia. Fonte: Adaptado de Jensen, (2009).

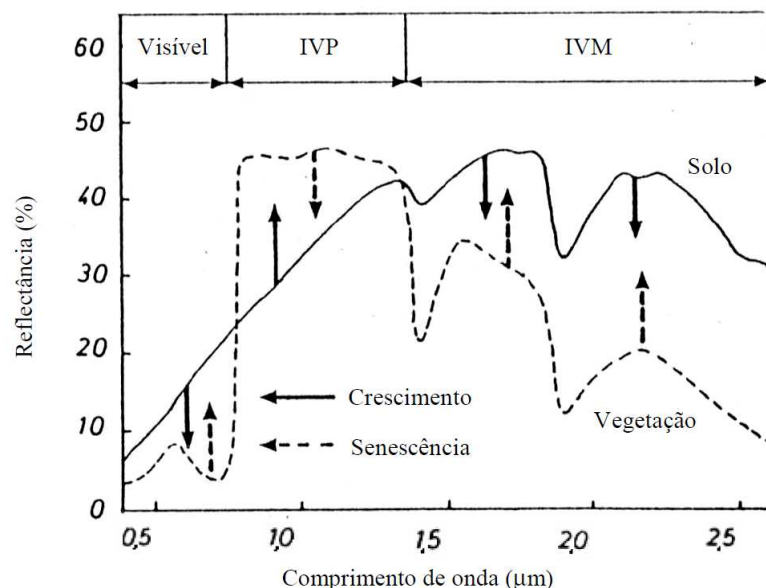


Figura 2.7. Representação esquemática da evolução da reflectância de uma cobertura vegetal ao longo das fases de crescimento e senescência: Fonte: Adaptado de Guyot, (1989) apud Esquerdo, (2007).

2.3.3. Índices de Vegetação

Desde a década de 1960, os cientistas vêm extraindo e modelando vários parâmetros biofísicos da vegetação com o uso de dados de sensoriamento remoto. Grande parte desse esforço tem envolvido o uso de índices de vegetação – que são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA, ou APAR, em inglês).

Um índice de vegetação ideal deve maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas, preferencialmente de uma forma linear, além de normalizar efeitos externos e internos em relação ao dossel. Deve também ser acoplável a algum parâmetro biofísico mensurável, tais como a biomassa, o IAF, ou a APAR, para fins de validação e de controle de qualidade (Jensen, 2009).

Segundo Moreira (2007), no sensoriamento remoto orbital, o índice de vegetação mais empregado na avaliação do vigor da cobertura vegetal é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*). Este índice,

desenvolvido por Rouse et al. (1974), é baseado na diferença entre a média da refletância na banda do vermelho e na banda do infravermelho. A partir desta diferença, é possível selecionar numa imagem de satélite que possua sensor nestas bandas, o que é vegetação. Além disso, é possível distinguir o vigor da vegetação através deste cálculo, sendo que quanto maior melhor a planta. Na equação 1 temos a equação do NDVI (Rouse, 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + \rho_{VER}} \quad (1)$$

Na qual:

ρ_{IVP} = refletância na banda do infravermelho próximo;

ρ_{VER} = refletância na banda do vermelho.

Diversos autores utilizam este índice, principalmente oriundo do sensor MODIS, onde o produto NDVI é disponibilizado na forma de imagens (Rizzi et al., 2007; Rafaelli et al., 2007; DÁrco et al., 2007).

Um segundo índice, chamado de índice de vegetação melhorado ou EVI (*Enhanced Vegetation Index*), foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta de vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa. Além disso, propicia o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas. O EVI pode ser calculado através da seguinte equação (Justice et al., 1998 apud Rudorff et al., 2007):

$$EVI = G * \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + (C_1 * \rho_{VER} - C_2 * \rho_{AZL}) + L} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{AZL} = refletância no azul;

C_1 e C_2 = são os coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis na atmosfera;

L = fator de ajuste do solo;

G = fator de ganho ajustado.

Huete et al. (2002), após analisar dados de NDVI e EVI durante 12 meses oriundos do sensor MODIS, verificaram que há uma maior variabilidade de valores de NDVI para semi-árido que para EVI, porém para locais úmidos este valor tende a ser constante. Ambos os índices de vegetação, apresentaram valores próximos para pastagens. O NDVI apresentou valor máximo de 0,90 (saturação) enquanto que para o EVI este limite superior não foi definido, variando de acordo com os alvos.

2.3.4. O sensor MODIS

O sensor *MODIS* (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) é o principal instrumento das plataformas Terra e Aqua, lançados pela NASA, respectivamente, em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002. Com órbita polar, estão a uma altitude de 705 km, passando pelo equador as 10:30hs (Terra) e as 13:30hs (Aqua) (horário local) e faixa imageada de 2330 x 5000km.

Projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera, o sensor MODIS cobre a Terra a cada 1 ou 2 dias (dependendo da posição geográfica), adquirindo dados em 36 bandas espectrais, ou faixas de comprimentos de ondas. Possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits), numa faixa de comprimento de ondas de 0,4 μm a 14,4 μm (MODIS, 2010).

Dentre as 36 bandas, apenas duas são disponibilizadas com resolução espacial de 250 metros, sendo uma correspondente a uma resolução espectral de 0,620 a 0,670 μm (faixa do visível no vermelho) e a outra de 0,840 a 0,876 μm (faixa do infra-vermelho próximo). A partir destas é possível obter diversos índices de vegetação, como por exemplo o NDVI.

Os produtos do sensor MODIS são disponibilizados gratuitamente em formato HDF (*Hierarchy Data Format*) no site do LP DAAC (<<http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp>>), em forma de *Tiles* de 10 x 10° (1200 x 1200 km). O sistema de coordenadas começa no *Tile* (0,0) (*tile* horizontal, *tile* vertical) no canto superior esquerdo e termina no canto direito inferior no *Tile* (35, 17) (MODIS, 2010). A Figura 2.8 ilustra o *tile* “h11v10” e a Figura 2.9 mostra os *tiles* utilizados para monitoramento na América do Sul (Rudorff et al., 2007a).

A partir das 36 bandas, são gerados 44 produtos MODIS, sendo que o produto MOD13Q1 possui 12 tipos de imagens, dentre elas as de índice de vegetação NDVI, EVI, *VI Quality* (Qualidade do índice de vegetação) e *Pixel Reliability* (Confiabilidade do pixel). Os objetivos e as características deste produto são gerar índices de vegetação por meio de imagens para minimizar ou mesmo eliminar presença de nuvens; obter os índices na melhor resolução espacial possível; padronizar a geometria de aquisição e iluminação das imagens; assegurar a qualidade e a consistência dos dados; descrever e reconstituir dados de variações fenológicas; discriminar com precisão variações interanuais na vegetação; gerar mosaicos de imagens compostas em períodos de 8, 16 e 30 dias. Os mosaicos de imagens para os períodos de 8, 16 e 30 dias são reamostrados e têm as seguintes características: mínimo de nuvens e correção atmosférica; os mosaicos de 16 dias para o NDVI e EVI têm resoluções espaciais de 250m, 500m, 1 km e 25 km (Rudorff et al., 2007a). Apesar do mínimo de nuvens, Moraes et al. (2011) mostra que os produtos de *VI Quality* e *Pixel Reliability* são de grande importância para o estado de São Paulo ao considerar o período de cultivo da cana-de-açúcar pois permite a eliminação de pixels com problemas desde ruídos a nuvens, melhorando a utilização de imagens do MOD13Q1.

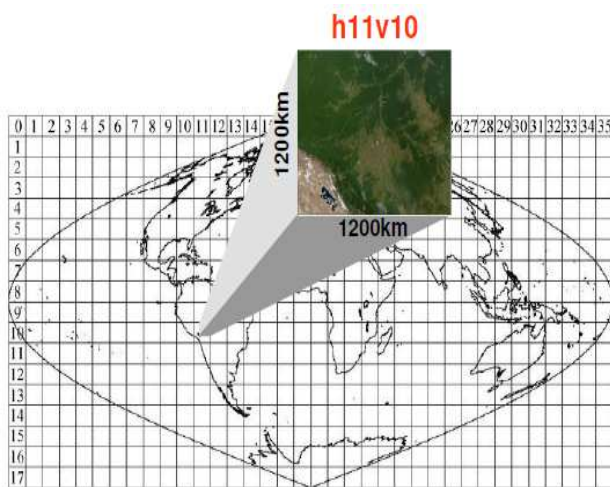


Figura 2.8. Representação do Tile h11v10 de 1200 x 1200km.

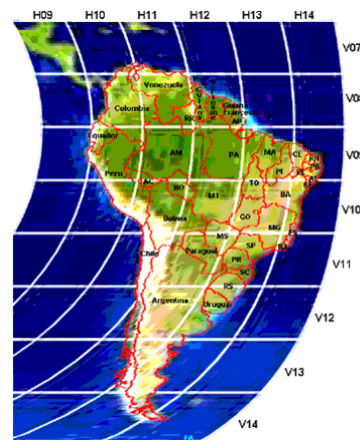


Figura 2.9. Representação dos Tiles da América do Sul.

FONTE: Adaptado de MODIS (2010).

2.3.5. Séries multi-temporais

O uso de séries multi-temporais de imagens de satélites permite acompanhar o comportamento de diferentes alvos na superfície. Áreas cultivadas apresentam grande variabilidade temporal na resposta espectral, principalmente em culturas onde há a exposição do solo antes do plantio ou após a colheita. Assim, séries multi-temporais são usadas quando uma única imagem não permite discriminar diferentes culturas agrícolas e diferentes estágios.

Béngue et al. (2008), analisando a variabilidade do NDVI dentro de um talhão de cana-de-açúcar, concluíram que com uma única data de imagem não é possível fazer um diagnóstico do estado da cultura. Além disso, é necessário conhecer o ciclo da cultura para interpretar de forma correta a variabilidade espacial.

A discriminação de culturas em imagens de satélite não é tarefa trivial e envolve inúmeros fatores. No entanto, uma análise multitemporal aliada ao padrão de cultivo, à experiência do intérprete e ao conhecimento da área de estudo e das culturas, possibilita um bom resultado na identificação de culturas agrícolas em imagens de satélite (Sanches et al., 2005).

Reed et al. (1994) utilizando de imagens do sensor AVHRR de NDVI considerando-as de forma temporal, confirmaram a possibilidade de monitorar a variabilidade da fenologia vegetal a partir do sensoriamento remoto. Além disso, permitiu também a separação de diferentes tipos de culturas agrícolas e florestas e a percepção de sua forte relação da variação do NDVI com a variabilidade climática. De modo a monitorar a variação da fenologia, Zhang et al. (2006) utilizaram de séries temporais de imagens de NDVI do sensor Modis para a determinação das fases de transição dos ciclos da vegetação para o nordeste dos Estados Unidos. Concluem que a metodologia desenvolvida além de obter as datas de transição de forma espacial na escala de pixel, ela independe do período temporal considerado.

Outros autores mostram que a partir de séries temporais de índice de vegetação do sensor Modis, é possível mapear e classificar, de forma específica, diversos tipos de cultura além da vegetação de um modo geral em várias partes do globo. Xial et al. (2005) apresentam o mapeamento do arroz na China; Potgieter et al. (2007) o mapeamento de culturas de inverno na Austrália; Wardlow et al. (2007) a distinção e mapeamento de milho, soja, alfafa e trigo nos EUA. No Brasil, o foco principal são as culturas do milho e soja na região sul e centro-oeste

(Esquerdo et al., 2011; Duft et al., 2011; Araujo et al., 2011; Bernardes et al., 2011; Yi et al., 2007; Rudorff et al., 2007, Rizzi et al., 2009) e a cana-de-açúcar no centro sul, seja para mapeamento (Xavier et al., 2006; Aguiar et al., 2008; Rudorff, 2009; Ramme et al., 2010) como para correlações entre o perfil temporal e a produtividade (Pontes et al., 2005; Fernandes et al., 2011).

Jönsson et al. (2004), desenvolveram o programa TIMESAT onde analisa séries temporais de NDVI com objetivo de extrair parâmetros sazonais sobre a África. Este classifica os perfis após uma suavização, tendo como saída parâmetros como início do perfil, crescimento, maximo vegetativo, amplitude, área do perfil acumulado, duração do ciclo, além da geração de mapas de numero de estações, início do crescimento da vegetação, amplitude e assimetria do primeiro crescimento da vegetação em relação a suavização. Tan et al (2011) afirma que além de simples, o TIMESAT permite a espacialização das datas de início da vegetação utilizando tanto EVI como NDVI do sensor Modis, porém com diferenças nas datas comparadas com dados observados e entre os índices de NDVI e EVI.

2.4. Modelagem Agrometeorológica

Das atividade econômicas, a agricultura é – sem dúvida – aquela com maior dependência das condições do tempo e do clima. As condições atmosféricas afetam todas as etapas das atividade agrícolas, desde o preparo do solo para a semeadura até a colheita, o transporte, o preparo e o armazenamento dos produtos. Como as condições adversas do tempo são freqüentes e muitas vezes imprevisíveis a médio e longo prazo, a agricultura constitui-se em atividade de grande risco (Pereira et al., 2002).

Do impacto da variabilidade do tempo e do clima sobre a produção agrícola, as variáveis agrometeorológicas são um dos principais insumos necessários para o funcionamento de modelos de simulação de culturas. O tempo é um dos componentes chave que controla a produção agrícola. Em alguns casos, constatou-se que 80% da variabilidade da produção agrícola é devido à variabilidade das condições meteorológicas, especialmente para sistemas de produção de sequeiro (Hoogenboom, 2000).

O monitoramento das condições do tempo de superfície é feito por estações meteorológicas automáticas ou convencionais de modo a gerar dados históricos para dada

região. Dessa forma, pode-se determinar a aptidão de uma área para uma determinada cultura em relação ao clima. O Brasil por suas dimensões continentais ainda não apresenta uma rede de estações meteorológicas que atenda às suas necessidades, sendo que em áreas mais desenvolvidas há um maior número do que em outras mais remotas (Pereira et al., 2002).

Segundo Greenland (2005), estabelecer relações quantitativas entre a variabilidade climática e os valores de rendimento de uma cultura é fundamental devido à importância econômica e no interesse em relação ao futuro da agricultura com as mudanças climáticas no século vinte um.

Os dados agrometeorológicos são utilizados em modelos que enfatizam o grau de penalização sobre o rendimento da cultura face às condições climáticas nos períodos críticos do desenvolvimento vegetativo da planta. Esta penalização, que tem componentes hídricos e térmicos, é estimada repetida vezes durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, com base em dados coletados a partir de estações meteorológicas terrestres do Instituto Nacional de Meteorologia, de órgãos estaduais e de outras entidades proprietárias de estações (Figueiredo, 2007).

Delgado-Rojas et al. (1999), utilizando dados meteorológicos para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar a partir de um modelo agrometeorológico, obtiveram bons resultados, podendo ser utilizado para estimativas. Porém, advertem Assad et al (2007), que a estimativa da produtividade com base em modelos agrometeorológicos é complexa, especialmente quando se pretende realizar estimativas em macro escala e consolidar seus resultados, para a obtenção de números que representem a realidade do país. Simões et al. (2005), descreveram a análise da evolução temporal de variáveis agronômicas da cana-de-açúcar de modo a ajustar modelos, porém afirmam que é necessária a introdução de mais variáveis como dados de solo e dados de sensoriamento remoto de modo a melhorar os modelos.

Segundo Abraha et al. (2006), as mudanças climáticas associadas ao aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera terão provavelmente uma maior influência regionalmente, afetando assim internacionalmente a produção de culturas. Desse modo, os modelos de produção têm sido usados extensivamente para estudar o impacto das alterações climáticas na produção agrícola e na segurança alimentar. Também foram aplicados para

avaliar o impacto da variabilidade climática do efeito do El Niño / Oscilação Sul (ENOS) sobre a produção (Hoogenboom, 2000).

Dentre os vários modelos de produtividade, o Método da Zona Agroecológica (ZAE) apresentado em Doorenbus e Kassan (1979) e Fischer et al., (2002), exige poucos dados de entrada e apresenta resultados próximos da realidade. Vários autores já constataram a eficiência do modelo em várias aplicações (Deng et al., 2006 ; Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2012).

Portanto, a aplicação da agrometeorologia no estudo das culturas agrícolas é de extrema importância, tanto em modelos de simulação como para análises de aptidão agrícola. Justifica-se assim a manutenção e a instalação de novas estações agrometeorológicas, de modo a aumentar a resolução tanto espacial como temporal da aquisição dos dados.

2.4.1. O modelo ECMWF

Dados meteorológicos observados ou estimados estão se tornando cada vez mais importantes por serem usados como dados de entrada em modelos regionais e globais. Dados como temperatura, precipitação, evapotranspiração e radiação, em escala regional, são utilizados em diversos modelos, como por exemplo, monitoramento de culturas, crescimento/penalização de culturas e estimativa de produtividade. Devido a restrições, incluindo logística, custos, tempo, cobertura, calibração de equipamentos e manutenção, envio, armazenamento, consistência e disseminação de dados, fica claro a dificuldade de obter observações meteorológicas de superfície em algumas áreas. Por esta razão, dados meteorológicos estimados por modelos são necessários e representam, em alguns casos, a única fonte de dados (Deppe et al., 2006).

Desse modo, o JRC (*Joint Research Centre*), através do projeto MARS (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*), disponibiliza dados meteorológicos utilizados em seus modelos de simulação de cultivos. Estes dados são originalmente gerados pelo modelo de circulação global ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) (Serio et al, 2006).

O ECMWF disponibiliza gratuitamente em seu *website* dados meteorológicos em forma de imagem com resolução espacial máxima de 0,25 grau de latitude e longitude e

temporal em forma de decêndios (cada 10 dias). Os dados simulados são: temperatura média (°C) [TAV], temperatura máxima (°C) [TMAX], temperatura mínima (°C) [TMIN], precipitação (mm = litros/m²) [RRR], evapotranspiração de superfície líquida (mm = litros/m²) [E0], evaporação de superfície do solo (mm = litros/m²) [ES0], evapotranspiração segundo modelo de Penman-Monteith (mm = litros/m²) [ET0], somatório da radiação global (kJ/m² por decêndio) [RAD], profundidade de neve média (cm) [SDAV], profundidade de neve mínima (cm) [SDMIN], profundidade de neve máxima (cm) [SDMAX], balanço hídrico (mm = litros/m²) [CWB] dado pela diferença entre precipitação e evapotranspiração, velocidade média do vento (m/s) [FFAV] e média de pressão de vapor d'água (hPa) [VAPAV]. Os dados do ECMWF são disponibilizados com resolução de 0,25 grau a partir do ano de 1989 e com resolução de 1 grau, desde 1978 com exceção dos produtos FFAV e VAPAV (JRC, 2010).

Long et al. (2006) compararam temperaturas máximas e mínimas de estações meteorológicas convencionais com os dados do modelo ECMWF e encontram resultados satisfatórios, principalmente na forma de graus-dias no período de verão na Argentina em um modelo de simulação de cultivo. Serio et al. (2006), objetivando validar os valores de precipitação do modelo em relação aos dados de estações e concluíram que apesar dos resultados não terem sido bons, não foram encontrados erros sistemáticos. Porém, Deppe et al. (2006), procurando validar dados de precipitação do modelo em relação a estações no Paraná, observaram que os dados possuem a mesma tendência, e que os dados poderiam ser utilizados para aplicações decendiais. Comparando dados de temperatura máxima e mínima e precipitação, oriundas de estações de superfície com dados do modelo ECMWF para o estado de São Paulo, Moraes et al. (2012b) encontraram resultados satisfatórios com $R^2 > 0,60$; $d > 0,7$; $RMSE < 5^{\circ}C$ e $< 50mm$; $Es < 5^{\circ}C$ e $< 24mm$, podendo assim ser utilizado de forma direta.

Aplicações utilizando os dados do ECMWF podem ser observadas em Blain et al. (2006), onde se comparou dados de temperatura do ar e precipitação obtidos de estações de superfície com dados do modelo ECMWF, e após ajuste foram usados em um modelo de estimativa de produtividade. Os autores concluíram que os dados do ECMWF podem ser usados para a estimativa da produtividade da soja no estado de São Paulo. Melo et al. (2007) aplicaram os dados do ECMWF diretamente sobre um modelo agrometeorológico-espectral e dados de superfície, de forma a obter o rendimento da soja. Analisando os resultados os

autores concluíram que os dados do ECMWF podem ser utilizados como opção para o cálculo de estimativa do rendimento da soja na maior região produtora do Rio Grande do Sul.

2.5. O uso de sensoriamento remoto e agrometeorologia no monitoramento da cana-de-açúcar

Conforme apresentado anteriormente, as imagens de sensoriamento remoto apresentam potencial para mapear e estimar áreas plantadas com cana-de-açúcar, principalmente devido à uniformidade do dossel e grandes extensões plantadas. Dados agrometeorológicos podem ser utilizados em modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais com intuito de estimar produtividade da cana-de-açúcar.

O mapeamento de áreas com cana-de-açúcar, dependendo da resolução do sensor do satélite, pode ser feito de forma manual, através de interpretação visual. Rudorff et al. (2005) e Rudorff et al. (2010), utilizando imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo dos satélites Landsat-5 e Landsat-7 com 30 metros de resolução espacial, mapearam a cana-de-açúcar na região centro sul do Brasil e concluíram que foi possível mapear a cultura, e classificar áreas de expansão e reforma, ficando atento ao período da imagem, onde outras culturas têm o mesmo comportamento espectral. Segundo Aguiar et al. (2008), a sequência temporal de imagens adquiridas entre abril e dezembro permite identificar as áreas de cana colhidas sem queima e, portanto, distingui-las das áreas de cana colhidas com queima, utilizando imagens Landsat-5.

Porém, é possível mapear a cana-de-açúcar com sensores de resoluções espaciais menores. Aguiar et al. (2008), utilizando imagens do sensor MODIS (250 metros), desenvolveu um método operacional para estimar a área colhida de cana-de-açúcar durante o período de oito meses de colheita (abril a novembro) no estado de São Paulo, concluindo que as imagens podem ser utilizadas para monitorar a atividade da colheita. Fernandes (2009) avaliou o potencial de uso de imagens decendiais do sensor SPOT Vegetation (1 km) para a identificação de áreas canavieiras do estado de São Paulo e concluiu que existe potencial na identificação dessas áreas, porém apenas em escala estadual, sendo em escala municipal não foi possível determinar com exatidão.

O conhecimento da produtividade da cana-de-açúcar no período que antecede a colheita juntamente com a área plantada permite fazer a previsão da safra ou da produção de dada área. De modo a obter a produtividade da cana-de-açúcar utilizando dados agrometeorológicos, Rudorff et al. (1990) não encontram resultados satisfatórios na variação da produtividade, devido principalmente a deficiências no modelo e por outros fatores como tipo de solo, fertilização, data de colheita, etc. Porém, ao propor um modelo onde foram utilizados dados espectrais juntamente com o agrometeorológico, houve uma melhora nos resultados.

Sugawara et al. (2007), avaliaram o uso de um modelo de regressão múltipla para estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar nos estágios de soca através de variáveis espectrais, meteorológicas e agronômicas. Após análise, concluíram que é possível estimar a produtividade de forma satisfatória, alertando que são necessários novos estudos para verificação de outros tipos de influência como tipo de corte manual para o mecanizado.

Picoli (2006), utilizando variáveis quantitativas e qualitativas, ou seja, dados agrometeorológicos e espectrais inseridos em um modelo, variedade da planta, tipo de solo, estágio de corte, aplicação de vinhaça, dentre outros, estimou a produtividade agrícola de talhões de cana-de-açúcar. Esta se baseou em um modelo de agregados de Redes Neurais Artificiais (RNA), que apresentou resultados satisfatórios.

Desenvolvido através da colaboração entre os cientistas associados ao Consórcio Internacional para aplicações de sistemas agrícolas (*ICASA- International Consortium for Agricultural Systems Applications*), o modelo CANEGRO é um poderoso instrumento para fazer previsões de crescimento da cultura de cana-de-açúcar e de estimativa de suas produtividades, tomando por base dados climáticos, teores de nutrientes e balanço de água no solo. Este modelo é um módulo que está inserido no software *DSSAT “Decision Support System for Agrotechnology Transfer”* (Silva e Bergamasco, 2001).

Embora o CANEGRO esteja calibrado para as condições da África do Sul, há resultados promissores para condições brasileiras, conforme Marin et al. (2009). Porém, para aplicações cujo objetivo seja analisar e prever a safra para extensas regiões como, por exemplo, o estado de São Paulo, se torna inviável, pois dados como cultivares, tipos de solo com alta resolução espacial, espaçamento entre plantas, adubação não estão disponíveis, além de demandar muito tempo de processamento computacional.

Assim, os modelos computacionais, em geral, são uma representação matemática de um sistema do mundo real. Na realidade, é impossível incluir todas as interações entre o ambiente e o sistema modelado num modelo de computador. Um modelo pode incluir muitas suposições, especialmente quando a informação que descreve as interações do sistema é inadequada ou não existe. Dependendo do enfoque científico, há diferentes tipos de modelos, podendo ser muito simples baseando-se em apenas uma equação, até para modelos extremamente avançados, que incluem milhares de equações (Hoogenboom, 2000).

3. METODOLOGIA GERAL

3.1. Área e período de estudo

O estudo foi realizado para o Estado de São Paulo (Figura 3.1), onde foram considerados todos os municípios do estado. Foi considerado o período de 12 meses, iniciando-se dezembro nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

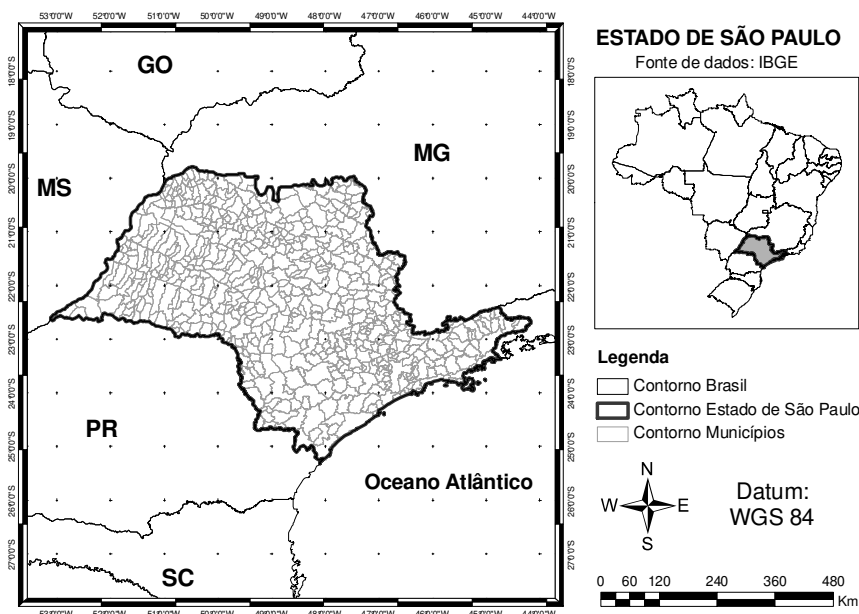


Figura 3.1. Localização da área de estudo no Brasil.

3.2. Fluxograma Geral da Tese

Na Figura 3.2 é apresentado o fluxograma geral da tese onde temos como dados de entrada as imagens de NDVI, VI Quality e Reliability do sensor Modis, dados agrometeorológicos de superfície, do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agrônomo (IAC) no estado de São Paulo, de precipitação (P), temperatura do ar máxima (Tx) e mínima (Tn) e dados agrometeorológicos do modelo global ECMWF (temperatura do ar máxima, mínima e média, radiação solar global, precipitação, evapotranspiração de referência). Os resultados são apresentados em formato de artigo, num total de quatro. As metodologias específicas entre os dados de entrada e os artigos, são apresentados nos resultados deste trabalho.

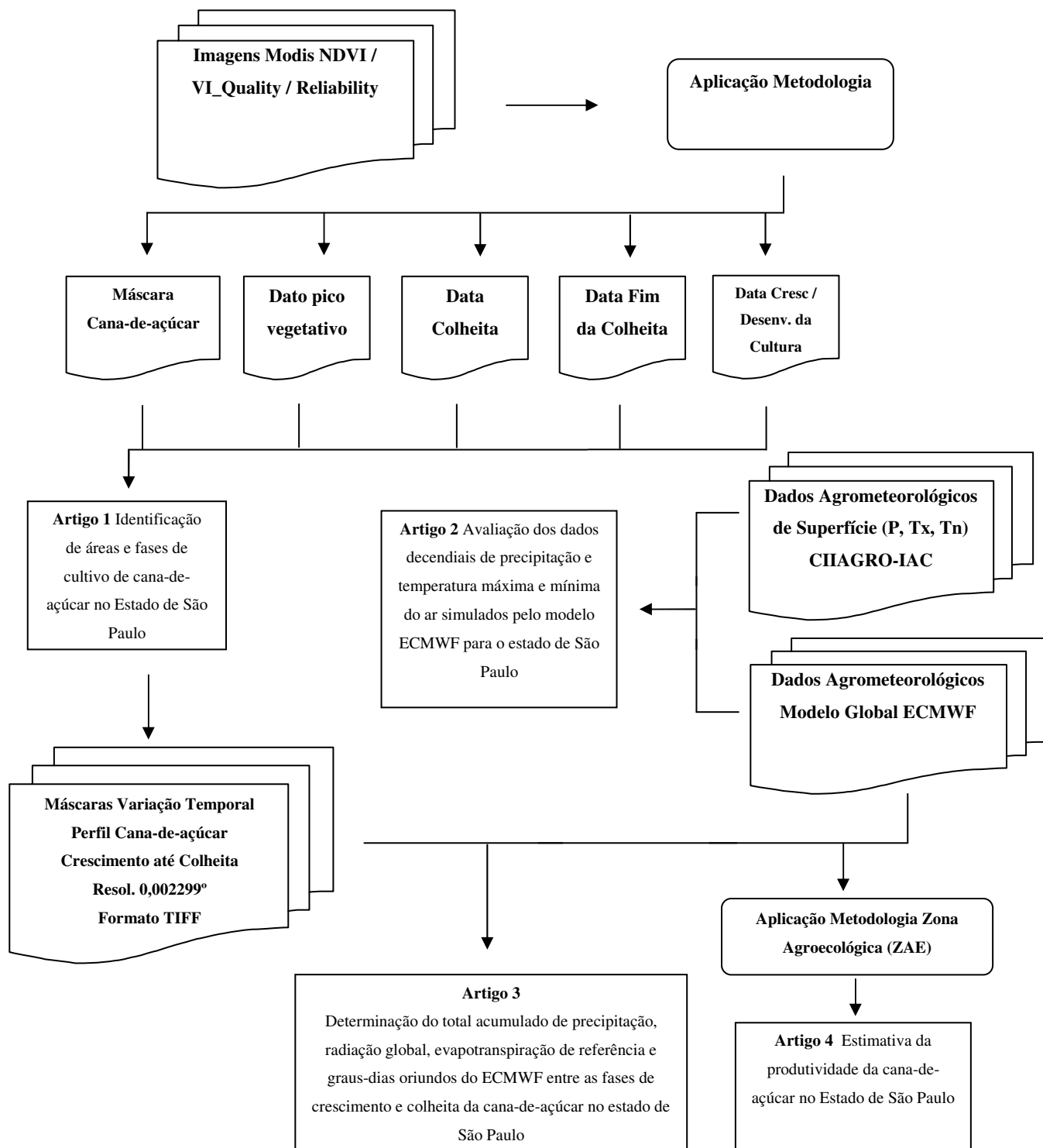


Figura 3.2. Fluxograma geral das principais etapas do trabalho desenvolvido.

3.3. Dados espectrais: sistema MODIS

Foram utilizadas 116 imagens, no período de 3 de dezembro de 2005 até 3 de dezembro de 2010, de NDVI, VI Quality e Reliability do produto MOD13Q1 (250m), tiles h13v10 e h13v11 na qual foi feito o mosaico e recortado o Estado de São Paulo. Este período foi selecionado de modo a acompanhar todo o ciclo da cana-de-açúcar, desde o crescimento seguido do máximo vegetativo, colheita e novamente crescimento/desenvolvimento. Estas imagens podem ser obtidas através do site da NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>), sendo originalmente na projeção sinusoidal e no formato HDF (*hierarchical data format*). A extração destes foi através da ferramenta *MODIS Reprojection Tool* (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool) e foram reprojitados para a projeção WGS-84 e formato GeoTiff.

As imagens de NDVI possuem valores de pixel que variam de -3000 a 10.000; as imagens de *Reliability* (Confiabilidade dos dados de índice de vegetação) possuem valores que variam de -1 a 3 conforme Tabela 3.1; já as imagens de *VI Quality* (Qualidade dos dados de índice de vegetação) possuem valores que variam de 0 a 65.534 conforme Tabela 3.2.

Para classificar os pixels bons nas imagens de NDVI, foram criadas máscaras para cada data, das imagens de *Reliability* e *VI Quality*, sendo a seleção de pixels conforme destaque em vermelho nas Tabelas 1 e 2 onde para *Reliability* apenas os pixels com valores 0 e 1 foram levados em consideração. Para as imagens de *VI Quality*, foram feitas combinações dos valores, gerando um número binário onde cada um foi transformando em um número decimal. Estas combinações, geraram um intervalo com valores de 4 a 37.572. Após este processo, foram somadas estas máscaras, esta foi aplicada nas imagens de NDVI, dia a dia, de forma a excluir os pixels. Seguido da extração, foram separados e excluídos os valores negativos da imagem de NDVI, referente à água.

Tabela 3.1. Descrição da Imagem *Pixel Reliability* do produto MOD13Q1.

Valor do Pixel	Resumo QA	Descrição
-1	Sem Dado	Não Processado
0	Dado Bom	Uso com Confiança
1	Dado Marginal	Utilizável, porém consultar outro QA
2	Neve/Gelo	Alvo coberto com neve/gelo
3	Nuvem	Alvo coberto com nuvens

Tabela 3.2. Descrição da imagem *VI Quality* do produto MOD13Q1.

Bits	Parâmetro	Valor	Descrição
0-1	Qualidade do IV	00	IV produzido com boa qualidade
		01	IV produzido com qualidade duvidosa
		10	Pixel produzido, porém provavelmente com nuvens
		11	Pixel não produzido
2-5	Utilidade do IV	0000	Qualidade perfeita
		0001	Alta qualidade
		0010	Boa qualidade
		0100	Qualidade média
		1000	Qualidade aceitável
		1001	Qualidade Regular
		1010	Qualidade intermediária
		1100	Baixa qualidade
		1101	Qualidade ruim, não permitindo o uso
		1110	Dado Faltante
		1111	Dado não utilizável por outra razão/não processado
6-7	Quantidade de Aerosol	00	Correção atmosférica baseada em climatologia
		01	Baixa
		10	Intermediária
		11	Alta
8	Nuvem adjacente	0	não
		1	sim
9	Correção BRDF	0	não
		1	sim
10	Nuvens misturadas	0	não
		1	sim
11-13	Máscara Água/Terra	000	Oceano raso
		001	Terra
		010	Oceano costeiro e praia
		011	Águas de baixa profundidade
		100	Águas efêmeras
		110	Águas profundas continentais
		111	Oceano profundo
14	Neve/Gelo	0	não
		1	sim
15	Possível sombra	0	não
		1	sim

3.4. Dados agrometeorológicos de superfície e do modelo do ECMWF

Os dados agrometeorológicos de superfície utilizados foram de precipitação (mm) e temperaturas máxima e mínima do ar (°C), proveniente de 33 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agronômico (IAC) no estado de São Paulo, com resolução temporal diária. Foram utilizados também dados do modelo global ECMWF de temperatura do ar máxima, mínima e média (°C), radiação solar global ($\text{kJ/m}^2 \cdot \text{dia}$), precipitação (mm), evapotranspiração de referência (mm) com resolução temporal decenal (10 dias) e espacial de 0,25 graus.

4. RESULTADOS

4.1. Artigo 1: Identificação de áreas e fases de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Rafael Aldighieri Moraes, Jansle Vieira Rocha e Rubens Augusto Camargo Lamparelli

Resumo - A identificação de áreas de cana-de-açúcar, assim como suas fases de cultivo de forma temporal e espacial, é de grande importância para o Brasil e principalmente para o Estado de São Paulo. O sensor Modis apresenta características que podem ser aplicadas para tal propósito, principalmente devido a sua resolução temporal e dados presentes no produto MOD13Q1. Neste trabalho, foram utilizadas imagens de NDVI, para identificação e monitoramento da cana-de-açúcar, qualidade (VI Quality) e confiabilidade (Reliability), que foram aplicadas para a eliminação de pixels falhos nas imagens de NDVI. Estes foram substituídos considerando os vizinhos próximos na série temporal. A partir das curvas do perfil temporal das imagens NDVI corrigidas, a série foi suavizada pela média e foram calculados o coeficiente angular e a variância, na forma de imagens. Isto permitiu visualizar diferenças entre cana-de-açúcar e outros usos da terra e possibilitou, por meio de classificação não supervisionada, mapear áreas cujo perfil temporal se assemelhasse ao de cultivo de cana-de-açúcar, além de identificar as fases de pico do ciclo vegetativo, colheita, final da colheita e desenvolvimento da cana-de-açúcar. Os resultados mostraram que a metodologia foi capaz de identificar perfis característicos de cana-de-açúcar e suas respectivas fases de cultivo.

Palavras-chave: perfil temporal, Modis, máscara.

Identification of areas and cultivation stages of sugarcane in São Paulo state

Abstract – The identification of sugarcane areas and their growing stages in temporal and spatial aspects are of great importance in Brazil and especially for the Sao Paulo state. The NDVI images were used for sugarcane identification and monitoring. Quality and Reliability images were used for the elimination of contaminated pixels. This pixels were replacement considering their nearest neighborhood on temporal profile. From NDVI temporal profile corrected, the series has been smoothed by average and transformed in slope and variance

profile.. This allowed visualize differences between cane sugar and other land uses and enabled through unsupervised classification, mapping areas whose temporal profile resembled the cultivation of sugar cane, besides identifying the phases of peak growth cycle, harvest, harvest and final development of cane sugar. The results showed that the method was able to identify characteristic profile of sugarcane and their respective stages of cultivation. However, there was an underestimation of the area compared to IBGE data and Canasat mainly in higher sugarcane area municipalities.

Keywords: temporal profile, Modis, mask.

4.1.1. Introdução

O Brasil é o país mais experiente em produção de etanol de cana-de-açúcar no mundo, sendo o principal exportador (Triana, 2011) e o maior produtor (FAOSTATS, 2012). Segundo o IBGE (2010), o Estado de São Paulo responde por aproximadamente 60% da produção de cana-de-açúcar no país. Desta, 85% da cana-de-açúcar é produzida na região sudeste e parte da sul e 15% na região nordeste do Brasil.

Assim, a identificação de áreas com cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é de grande importância para o planejamento governamental e privado. Já a divisão das fases de cultivo, oferece uma visualização estratégica da dinâmica espacial e temporal de todo o processo do cultivo da cultura. Uma das formas para o levantamento da área cultivada é a aplicação de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do projeto Canasat, monitora o cultivo da cana-de-açúcar desde 2003 para os estados produtores de cana da região centro-sul (Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo, além de Espírito Santo e Rio de Janeiro desde 2010). Este utiliza imagens dos satélites LANDSAT-5 e o CBERS-2B onde, através da vetorização manual, identifica e mapeia visualmente áreas cultivadas com cana-de-açúcar, gerando a cada ano safra, mapas temáticos com a distribuição espacial da cana (Rudorff et al., 2010). Porém essa metodologia não permite a classificação automática além de depender de corpo técnico especializado.

O Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Modis) é um sensor a bordo do satélite Terra (EOS AM) e Aqua (EOS PM) adequado ao monitoramento de coberturas vegetais. As imagens deste sensor de moderada resolução espacial (250 m) e alta resolução

temporal (1 a 2 dias) são disponibilizadas gratuitamente, em composição de 16 dias, tendo como um de seus produtos imagens de índices de vegetação (Modis, 2010).

Vários autores identificaram que é possível monitorar de forma eficiente a vegetação através da análise multi-temporal de imagens de NDVI do sensor MODIS (Xiao et al., 2005; Zhang et al., 2006; Biggs et al., 2006; Chen et al., 2009). Segundo Xavier et al. (2006), o mapeamento da cana-de-açúcar a partir de imagens Modis é adequado para identificar e monitorar áreas com cana-de-açúcar, baseadas em análises de imagens multi-temporal. Aguiar (2008) mostrou que é possível tanto a identificação da área quanto da data colheita da cana-de-açúcar através de imagens NDVI do sensor Modis.

Com o intuito de desenvolver uma metodologia simples e funcional, este trabalho teve como objetivo identificar e mapear a cana-de-açúcar no estado de São Paulo e classificar as fases de cultivo através da análise e identificação de perfis temporais de imagens de NDVI do sensor MODIS.

4.1.2. Material e Métodos

O estudo abrangeu o Estado de São Paulo, considerando todos os municípios do estado. Foi considerado o período de 12 meses, iniciando em dezembro nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010. Foram utilizadas 116 imagens, no período de 3 de dezembro de 2005 até 3 de dezembro de 2010, de NDVI, VI Quality e Reliability do produto MOD13Q1 (250m), tiles h13v10 e h13v11 na qual foi feito o mosaico e recortado o Estado de São Paulo. Este período foi selecionado de modo a acompanhar todo o ciclo da cana-de-açúcar, desde o crescimento, seguido do pico vegetativo, colheita e novamente crescimento/desenvolvimento.

Estas imagens foram obtidas através do site da NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>), sendo originalmente na projeção sinusoidal e no formato HDF (hierarchical data format). A extração destes foi através da ferramenta Modis Reprojection Tool (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool) e foram reprojados para a projeção WGS-84 e formato GeoTiff.

De modo a atender o objetivo, a metodologia aplicada neste trabalho se propõe a identificar e classificar áreas onde o comportamento temporal do NDVI, ou seja, a forma da curva se assemelha ao cultivo de cana-de-açúcar. Todas as fases do trabalho foram executadas

utilizando o software ENVI 4.5 (The Environment for Visualizing Images) a partir da geração de rotinas em IDL (Interactive Data Language) versão 7.0. Para a geração dos mapas foi utilizado o ESRI ArcMap 9.3.1. As etapas do trabalho são apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 4.1.1).

Para classificar os pixels bons nas imagens de NDVI, foram criadas máscaras para cada data, das imagens de Reliability e VI Quality, sendo a seleção de pixels conforme Moraes e Rocha (2011).

Após serem eliminados os pixels falhos, teremos no perfil considerado pixels faltantes iguais a zero. Com intuito de preservar a forma da curva, foram propostas regras simples de substituição destes pixels para até três faltantes seguidos, descritas a seguir.

Quando houve quatro pixels faltantes seguidos, o perfil foi desconsiderado para o período de safra em estudo. Para três pixels faltantes seguidos, foi considerado que o primeiro e o terceiro fossem iguais ao anterior e posterior respectivamente; após este processo, o segundo foi substituído pela média dos novos valores. No caso de faltarem dois pixels seguidos, foram substituídos de modo que o primeiro seja igual ao anterior e o ultimo igual ao posterior. Finalmente, para um pixels faltante, foi substituído pela média do valor anterior e posterior. Assim, após a substituição dos valores faltantes, foi preservada a forma dos perfis, principalmente pela não alteração da tendência da curva, baseada nos vizinhos próximos.

A suavização do perfil temporal do comportamento do NDVI é importante pelo fato de eliminar pequenas variações. Hird e McDermid (2009), comparando a capacidade de técnicas para a redução de ruídos e a habilidade em preservar a forma e amplitude de séries temporais, constataram que o filtro de média pode alterar valores altos e rápidas alterações no perfil. Apesar disso, Ma & Veroustraete (2006), com objetivo de reconstruir séries temporais de NDVI do sensor AVHRR, utilizaram a metodologia de média móvel, e esta se mostrou eficiente para a redução de ruídos de nuvens, melhorando a qualidade da série temporal e o classifica de método simples e eficiente.

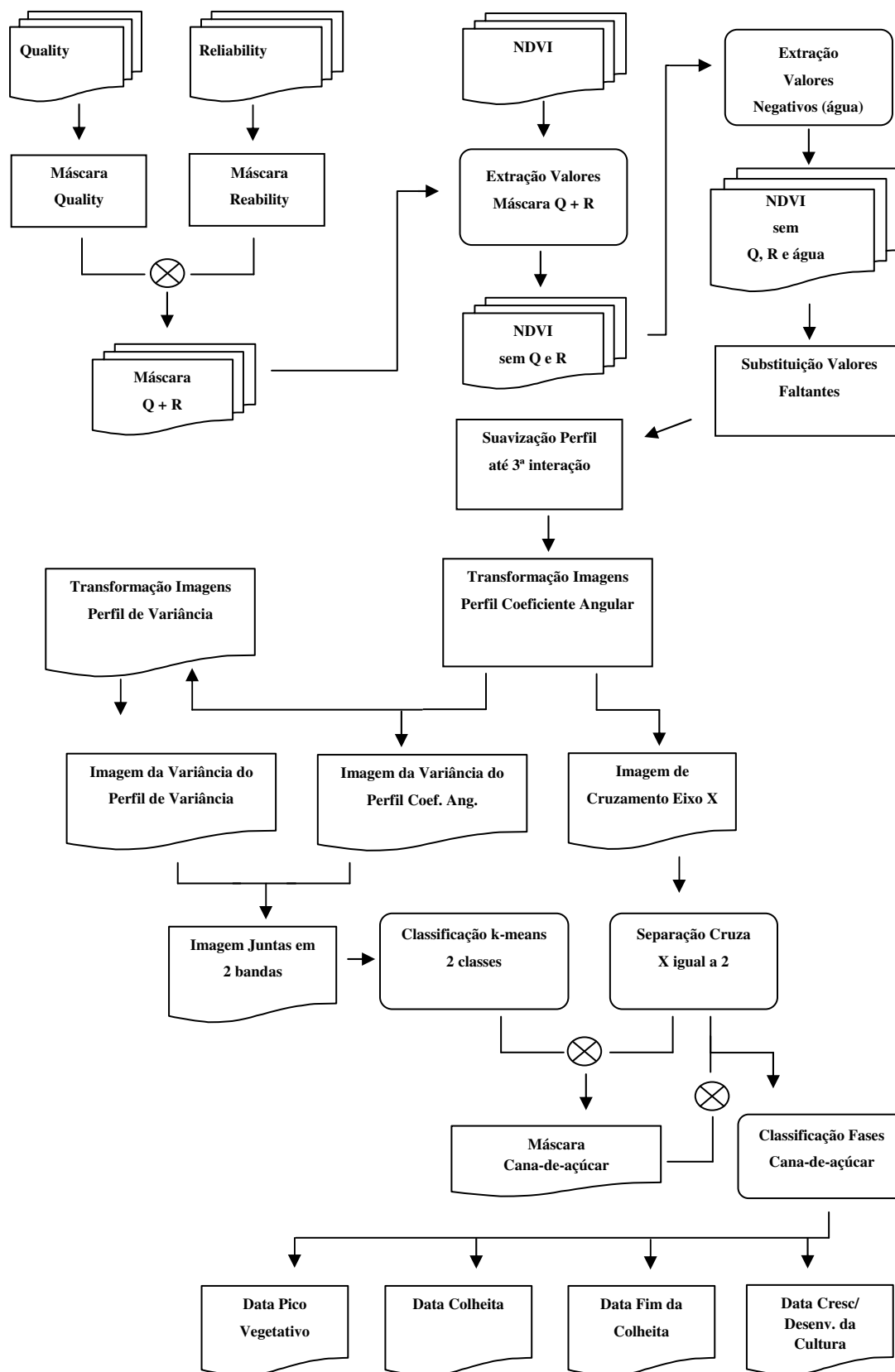


Figura 4.1.1. Fluxograma das etapas do trabalho.

A metodologia de suavização utilizada neste trabalho tem como objetivo facilitar a classificação do pixel, destacando a forma e tendência da curva do perfil temporal, já que não há valores com ruídos, pois foram excluídos na fase anterior. Para tal, foi executada uma suavização baseada na média móvel, aplicado ao perfil temporal de NDVI. Esta suavização utiliza uma janela móvel que considera três pontos e ao mover-se no perfil a ser suavizado, gera um novo valor (média dos três pontos) posicionado no ponto central da janela. Assim, para cada ponto gerado no perfil suavizado, foram necessários três do perfil observado. Esta sequência inicia-se com os dados brutos de NDVI, gerando um perfil de 1ª interação e a partir deste o processo é repetido até a 3ª interação, obtendo o perfil suavizado final. O primeiro e último valor da série é repetido sendo de igual valor ao segundo e penúltimo respectivamente.

O perfil de NDVI, depois de suavizado, apresenta características determinantes em relação à forma da curva, onde destaca as fases de crescimento, amadurecimento e colheita. Porém, apesar da forma da curva ser semelhante nos pixels onde há cana-de-açúcar, há variação na intensidade do NDVI e nas datas de colheita. Assim, com o objetivo de analisar a forma da curva e sua intensidade, foi efetuada a transformação das imagens de NDVI suavizadas em imagens de coeficiente angular e de variância respectivamente.

As imagens de coeficiente angular ou inclinação da linha de regressão linear, são geradas a partir da interação de três pixels no perfil onde é calculada a inclinação da reta. Destes três pontos, é gerado um valor de coeficiente angular que será plotado em um novo perfil temporal (Figura 4.1.2). Este processo foi repetido, percorrendo todo o perfil até a última imagem, sendo que o primeiro e último valor da série foi repetido e assim de igual valor ao segundo e penúltimo respectivamente.

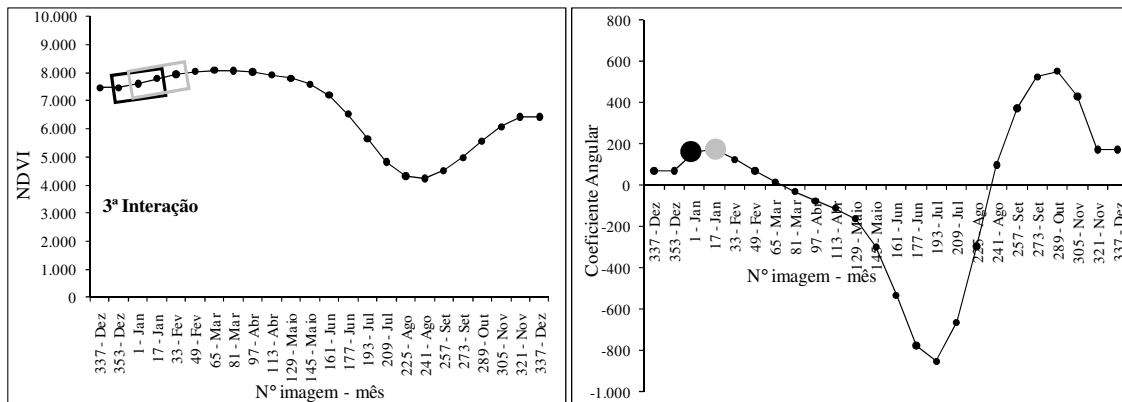


Figura 4.1.2. Comportamento do perfil de NDVI suavizado e transformado em coeficiente angular destacando nos quadros preto e cinza os dados utilizados e os pontos pretos e cinza os respectivos resultados, sendo que a execução é aplicada para todo perfil.

Com o objetivo de destacar ainda mais a informação presente no perfil temporal, foi proposta a geração do perfil temporal de variância a partir do perfil temporal do coeficiente angular. Este foi executado tomando de início os três pontos iniciais do perfil de coeficiente angular e calculando a variância, sendo o resultado plotado no valor central; e o processo foi repetido para todo o perfil. Da mesma forma anterior, o primeiro e último valor da série foi igual ao segundo e penúltimo respectivamente, conforme Figura 4.1.3.

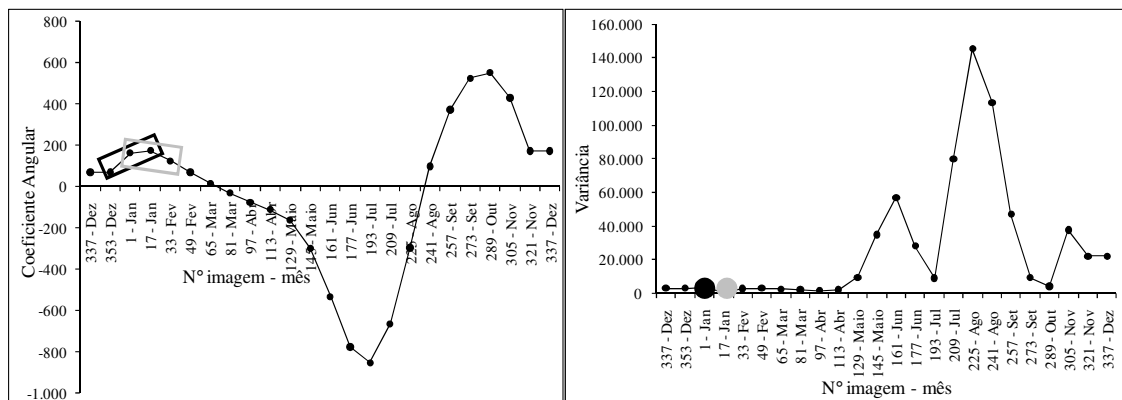


Figura 4.1.3. Comportamento do perfil de coeficiente angular e transformado em perfil de variância destacando nos quadros preto e cinza os dados utilizados e os pontos pretos e cinza os respectivos resultados, sendo que a execução é aplicada para todo perfil.

Após a geração dos novos perfis temporais de coeficiente angular e variância, para as imagens de cada período, foi calculada a variância dos valores dentro de cada perfil temporal. Assim, foram geradas duas imagens onde cada pixel representa o valor da variância em cada perfil temporal, sendo uma imagem da variância do perfil de coeficiente angular e outra do perfil de variância. Estas duas imagens geradas, para cada período, foram unidas de modo que cada uma representasse uma banda.

Com as imagens unidas, foi executado o classificador não supervisionado k-means, com um número de classes igual a dois, limiar de 5% e número máximo de iterações igual a um. Dessa forma, o objetivo era separar áreas com grande variação do NDVI no período considerado de áreas com perfil temporal com comportamento fixo ou de baixa variação. O intuito da imagem de variância do perfil temporal de coeficiente angular era auxiliar na separação de áreas com grande variação temporal e a imagem da variância do perfil temporal da variância do perfil do coeficiente angular foi contribuir na separação de áreas onde a variação do perfil apresentasse diferenças abruptas em determinados pontos, indicando áreas com agricultura nas fases de colheita. Assim, estas imagens classificadas foram transformadas em máscaras com valores zero e um, sendo um os pixels com maior variância.

O perfil do coeficiente angular possui variações positivas e negativas, onde caracterizam a inclinação do perfil do NDVI. Esta variação positiva/negativa, ou seja, o cruzamento do perfil sobre o eixo x ocorre sempre após uma alteração da direção do perfil de NDVI, como por exemplo, do crescimento de uma cultura até a fase de senescência ou a colheita propriamente dita.

O cruzamento do eixo x para o perfil do coeficiente angular foi contabilizado de modo a separar pixels onde a forma do perfil temporal do NDVI apresentasse uma fase de inclinação negativa seguida de uma fase de inclinação positiva. Essa característica, para o período considerado, destacaria pixels onde haveria perfis cuja forma era semelhante ao de cana-de-açúcar, onde há uma colheita (queda do valor do NDVI) seguida da rebrota/plantio da cultura.

Podem ser incluídos pixels de pastagem, que possui comportamento semelhante ao da cana-de-açúcar, porém apenas onde há o cultivo intensivo. Para o cultivo extensivo, a variância do perfil temporal é baixa e sendo assim eliminada no processo descrito anteriormente.

Assim, foram separados apenas os pixels cujo perfil temporal do coeficiente angular cruzasse o eixo x apenas duas vezes e gerada uma máscara com valores para tais, igual a um, e zero para valores fora desta consideração.

Para a geração da máscara final da cana-de-açúcar, foi executada a multiplicação da máscara gerada a partir da classificação das imagens de variância pela máscara do cruzamento do eixo x igual a dois. Dessa maneira, foram obtidos apenas os pixels coincidentes, ou seja, igual a um e possuindo assim características de grande variação no perfil temporal e apenas um período de colheita/crescimento.

A partir das imagens de coeficiente angular, foi possível a classificação dos pixels de cana-de-açúcar devido à forma característica do perfil. Além disso, puderam ser identificadas a partir do perfil do coeficiente angular as datas das fases de cultivo da cana-de-açúcar, ou seja, data do pico vegetativo, colheita, fim da colheita e crescimento/desenvolvimento. Estas datas foram determinadas a partir dos valores máximos, cruzamento do eixo x, valores mínimos e novamente cruzamento do eixo x, respectivamente. Na Figura 4.1.4 é possível identificar as características do perfil do coeficiente angular contrastando com o perfil de NDVI com dados brutos e suavizados.

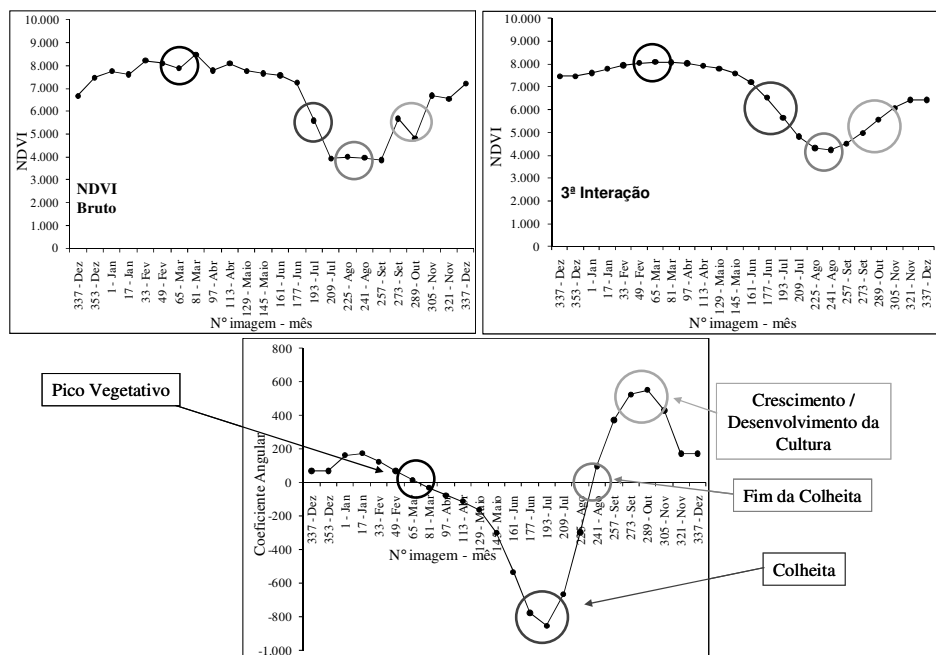


Figura 4.1.4. Características do perfil temporal de NDVI da cana-de-açúcar identificadas no perfil temporal de coeficiente angular, sendo os círculos representando as datas das fases de cultivo.

4.1.3. Resultados e Discussão

Após a execução das rotinas conforme citado anteriormente, foi gerada a máscara da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo, para o período considerado, e é apresentado na Figura 4.1.5. Apesar da grande variação da área no decorrer das safras, verifica-se que áreas sem predominância do cultivo da cana-de-açúcar foram excluídas da máscara, como o sul e sudoeste do estado. Já as áreas em que há o predomínio do cultivo, houve uma grande identificação, tornando menos efetiva nas safras de 2007/2008 e 2008/2009.

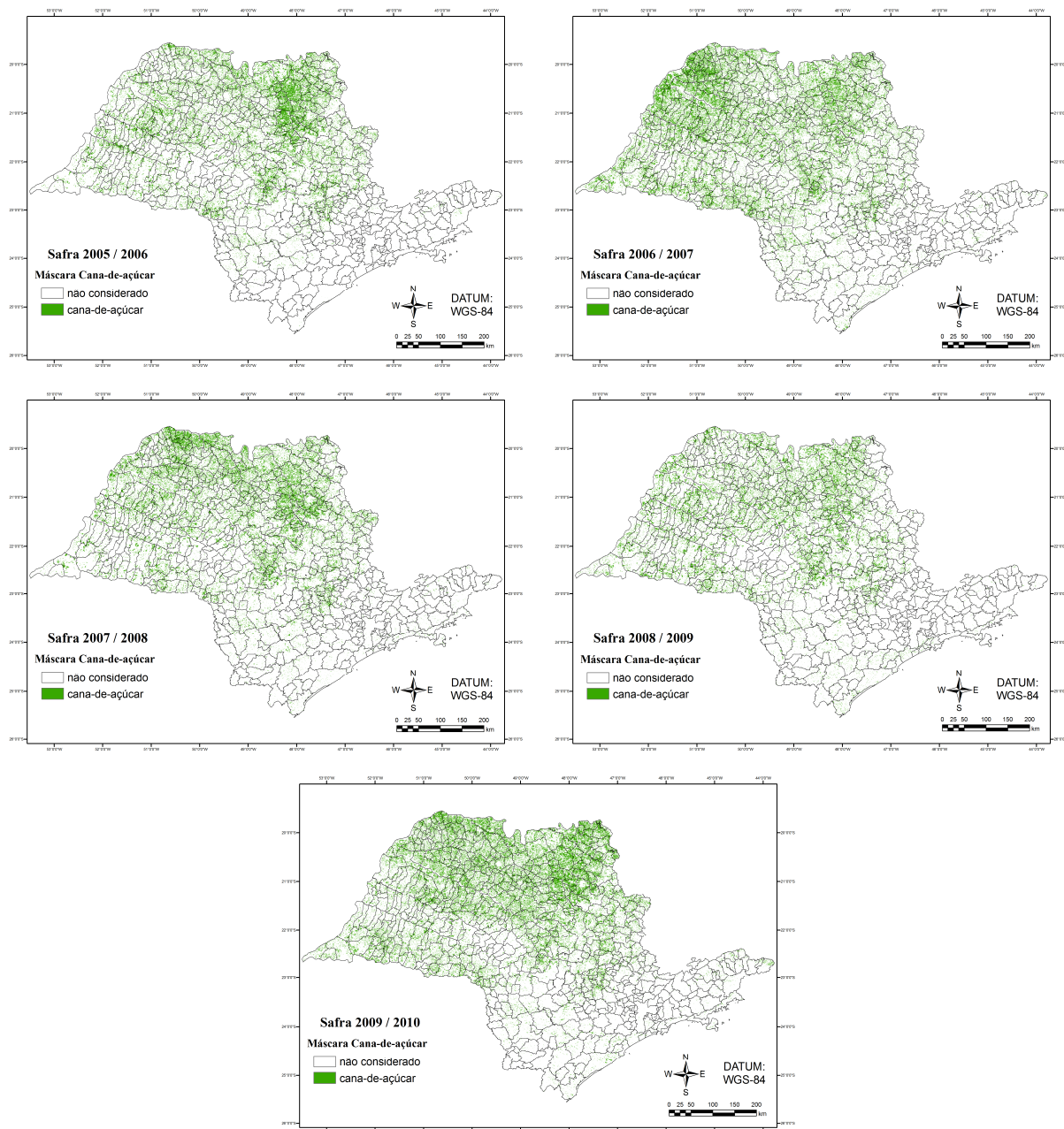


Figura 4.1.5. Máscara de cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

Após a geração das máscaras para cada ano safra, foi contabilizado o número de pixels, considerando todo o estado e considerando a área por município. Na tabela 4.1.1, temos a área total encontrada por safra, onde é comparado com dados do IBGE (2011) para os anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009 e com os dados do Canasat (2011)

para a safra 2009/2010, devido à ausência de dados oficiais do IBGE até a presente data (março de 2011). Destaca-se que as diferenças percentuais entre os dados do IBGE e Canasat nos outros períodos, ficaram entre -4,1% até 4,5%, sendo possível a utilização dos dados Canasat para o período de 2009/2010. Verifica-se que considerando todo o estado, as maiores diferenças ocorrem principalmente em 2007/2008 e 2008/2009, com erros percentuais negativos, entre -35,7% até -48,7%, sendo que nos outros períodos há também uma subestimativa.

Tabela 4.1.1. Comparação da área total de cana-de-açúcar colhida no Estado de São Paulo considerando dados do IBGE e Canasat em relação à estimativa obtida pela metodologia e a diferença entre dados do IBGE e Canasat.

Total Área de Cana-de-açúcar (ha)			Erro (%)	Diferença IBGE - Canasat	
safra	IBGE	Máscara		Dif (ha)	Dif (%)
2005/06	3.498.265,0	2.821.908,1	-19,3	143.794	-4,1
2006/07	3.890.414,0	3.777.840,1	-2,9	-71.515	1,8
2007/08	4.530.784,0	2.912.239,7	-35,7	85.507	-1,9
2008/09	4.687.325,0	2.406.907,7	-48,7	-210.453	4,5
2009/10	4.996.549,0 *	3.933.322,0	-21,3	-----	-----

*fonte de dados: Canasat

Esta subestimativa para todos os períodos do estudo foi devido principalmente à resolução espacial do sensor Modis, onde cada pixel tem uma área equivalente a 6,25 hectares e resolução temporal (composição) de 16 dias. Caso a área identificada como cana-de-açúcar não seja totalmente colhida, ocorre uma descaracterização da forma do perfil temporal de NDVI e assim não sendo identificado pela metodologia. Além disso, pequenas áreas de cana-de-açúcar, menores que o pixel do Modis, não são identificadas pela mesma razão. Petrini et al., (2011), comparando perfis temporais de NDVI a partir de pixels puros e não puros, mostraram que há uma suavização do perfil temporal, e assim descaracterizando sua forma.

No período de 2007/2008, elevados níveis de precipitação pluviométrica no período inicial ocasionaram atraso no cronograma de moagem da cana-de-açúcar e por fim menor volume colhido (CONAB, 2008). Já em 2008/2009, segundo a CONAB (2009a; 2009b), houve uma quantidade de chuvas acima do normal nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, cujo ritmo da moagem é mais intenso e a cana oferece maior concentração de

sacarose, afetando o andamento da moagem com interrupções na colheita. Assim, a precipitação pode interromper o ritmo da colheita das áreas de cana-de-açúcar, onde o pixel sendo colhido parcialmente suaviza o perfil temporal, prejudicando a identificação.

A partir do perfil do coeficiente angular, foi possível a identificação das fases de cultivo da cana-de-açúcar, sendo estas o período de pico vegetativo, colheita, fim da colheita e crescimento e desenvolvimento da cultura. Zhang et al., (2003), mostraram que é possível indicar as fases de transição fenológica a partir de mudanças na curvatura do perfil temporal do sensor Modis.

O período de pico vegetativo foi identificado de modo a ser o momento em que antecede a colheita, ou seja, quando o valor do NDVI deixa de ser constante e apresenta uma queda. Na Figura 4.1.6 é apresentada a classificação dos pixels, para as safras em análise, de acordo com a data da imagem em que ocorreu o pico vegetativo. Verifica-se que em 2005/2006 o pico vegetativo ocorreu principalmente em fevereiro e março, com algumas áreas em abril. Em 2006/2007 o pico vegetativo ocorreu principalmente em janeiro e fevereiro com algumas áreas em março/abril. Nas safras 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 houve da mesma forma o pico vegetativo entre os meses de janeiro e abril.

Na Figura 4.1.7, é apresentada a classificação da fase de cultivo dada como colheita, onde temos a data em que ocorreu a colheita de dada área. De acordo com a classificação, verifica-se que a colheita ocorre principalmente entre junho e agosto, com algumas áreas entre maio e junho e outras menores entre setembro e novembro.

A classificação do fim da colheita identifica o período onde o perfil do NDVI apresenta valores mínimos com certa constância, ou seja, onde já houve a colheita da cana-de-açúcar e o solo/palha está sobre o solo. De acordo com a Figura 4.1.8, este período ocorre principalmente nos meses de setembro a novembro nas safras 2005/2006, 2006/2007, e durante o período classificado anteriormente como colheita, de junho a agosto nas safras de 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

A última fase de classificação foi a nomeada crescimento/desenvolvimento, onde separa a data em que o perfil do NDVI apresenta uma inclinação positiva. Conforme Figura 4.1.9, na safra 2005/2006 a cana-de-açúcar iniciou seu crescimento principalmente no mês de outubro, com áreas no oeste do estado em setembro e algumas em novembro. Já na safra 2006/2007 o crescimento ocorreu principalmente no mês de novembro, com predominância

também em outubro a oeste do estado. Na safra 2007/2008 o período foi de setembro a novembro assim como em 2008/2009. Em 2009/2010 houve destaque para o mês de outubro, com áreas em setembro a oeste do estado e em novembro a nordeste.

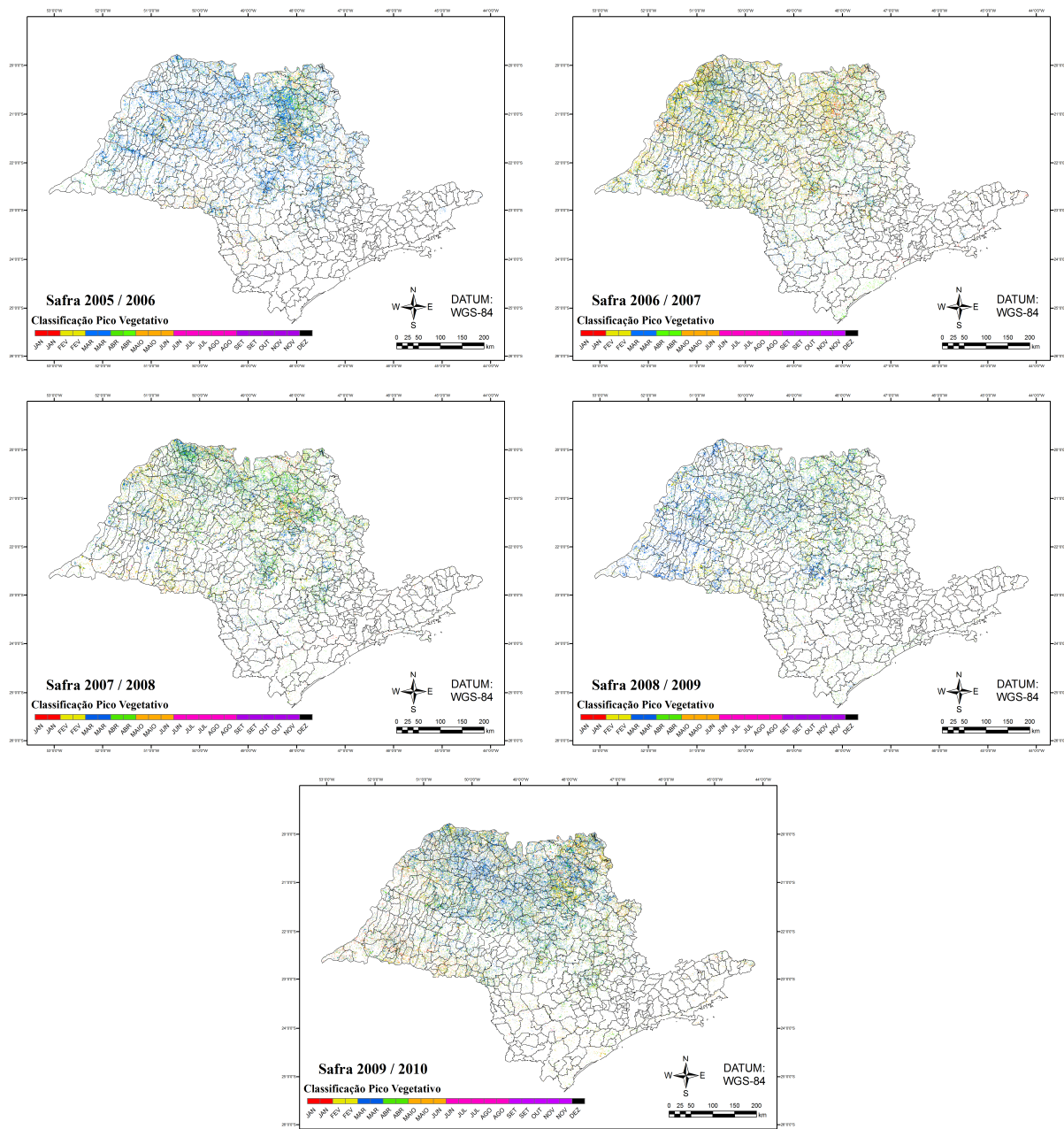


Figura 4.1.6. Máscara da fase de cultivo Pico vegetativo da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

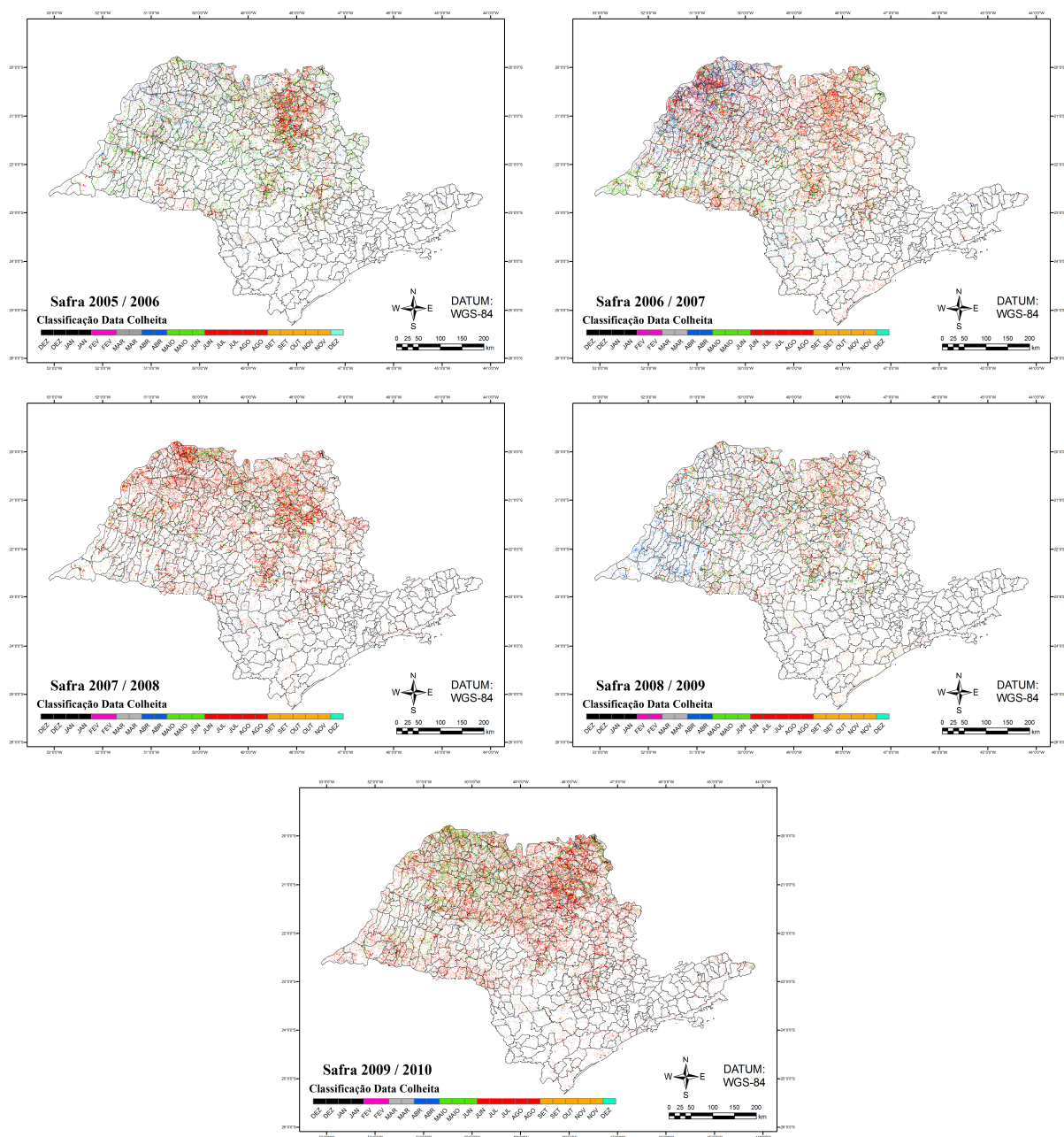


Figura 4.1.7. Máscara da fase de cultivo Colheita da cana-de-açúcar para as safras as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

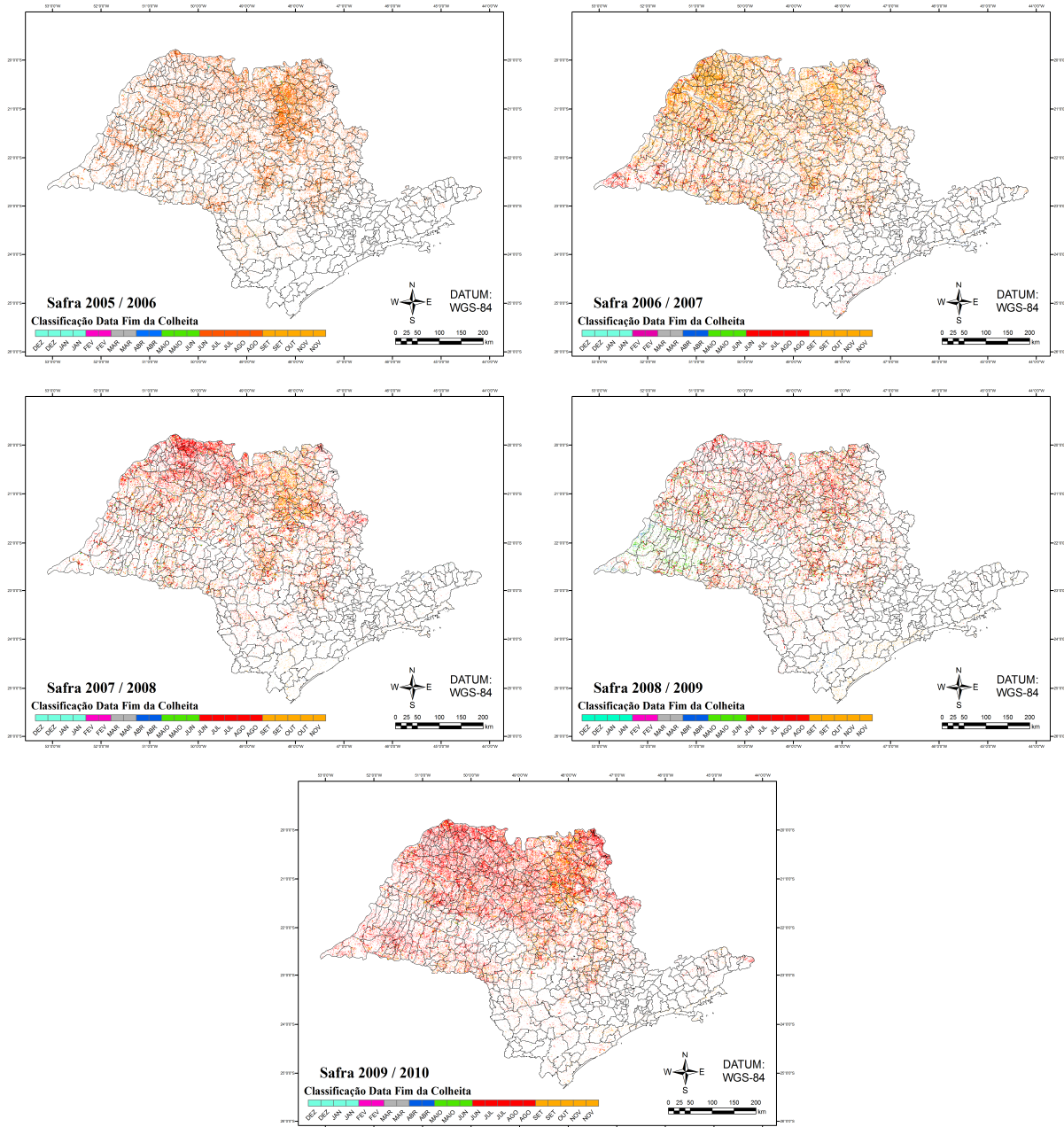


Figura 4.1.8. Máscara da fase de cultivo Fim da Colheita da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

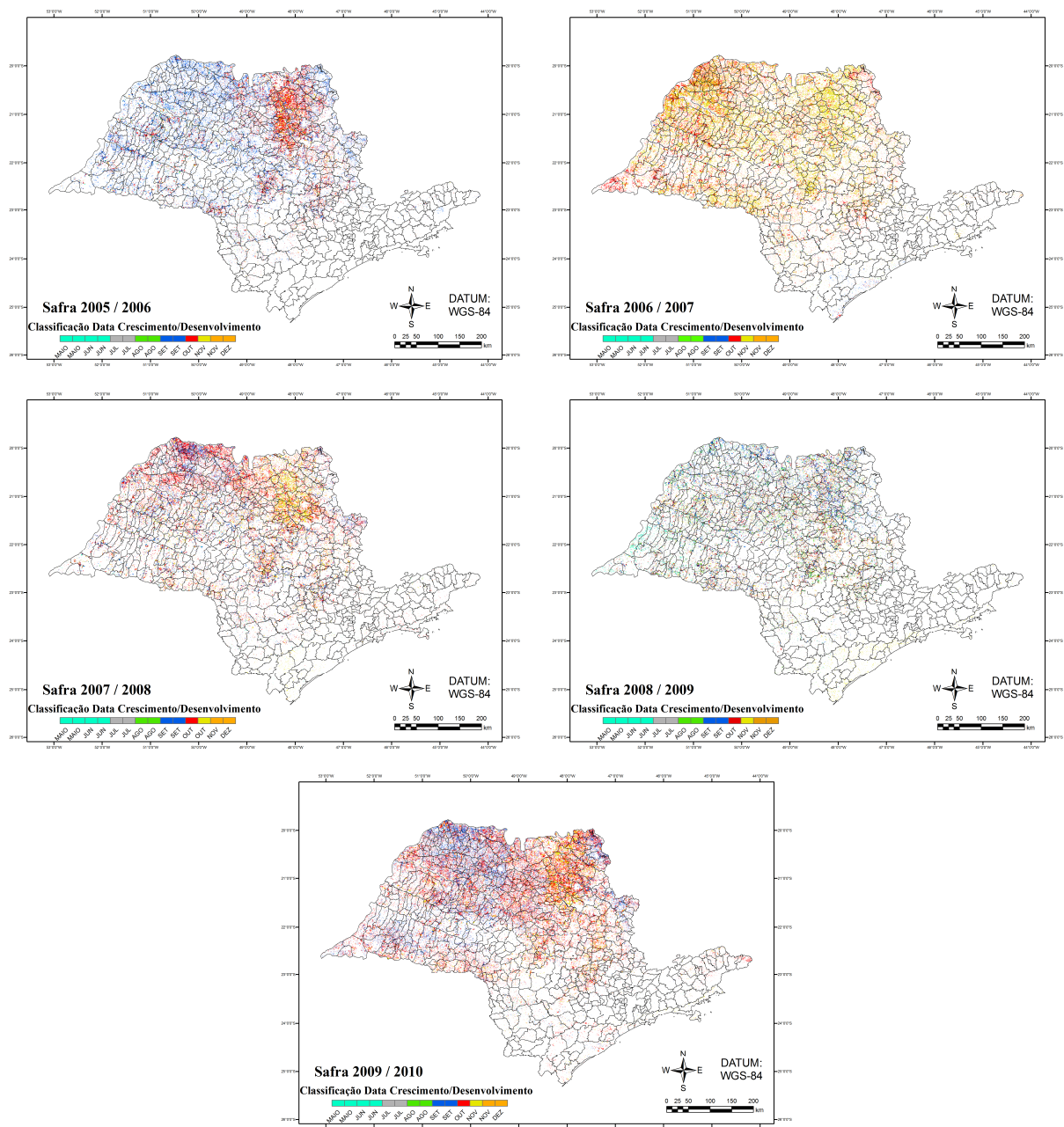


Figura 4.1.9. Máscara da fase de cultivo Crescimento/Desenvolvimento da cana-de-açúcar para as safras 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

Na Figura 4.1.10, temos a disposição da área de cana-de-açúcar colhida por município, considerando dados oficiais do IBGE e do Canasat para safra 2009/2010 *versus*

dados mapeados pela metodologia. Apesar da subestimação das áreas, verifica-se que o coeficiente de determinação apresentou valores maiores que 0,64 e índice de Willmott maior que 0,82, indicando uma estimativa coerente com os dados oficiais e o Canasat.

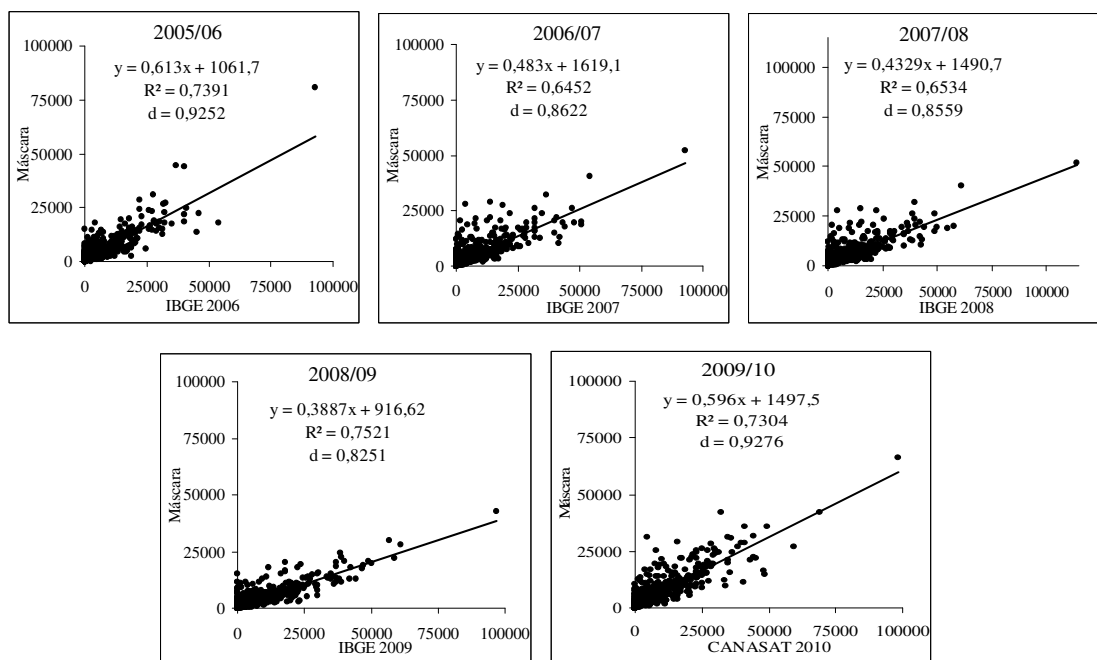


Figura 4.1.10. Comparação dos dados municipais no Estado de São Paulo da área de cana-de-açúcar estimada em relação aos dados do IBGE nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e em relação ao Canasat no ano de 2009/2010; juntamente com o coeficiente de determinação (R^2) e índice d de Willmott.

De modo, a saber, se a estimativa da área de cana-de-açúcar apresentou erros em municípios com grande ou pequena área de cultivo, foram dispostos às áreas de cultivo dos dados oficiais em ordem decrescente e a partir desta foi feita a diferença da área estimada menos o dado do IBGE e Canasat e plotado nos gráficos da Figura 4.1.11. Verifica-se assim que as maiores diferenças ocorreram nos municípios com grandes áreas de cultivo, onde houve a subestimação da área.

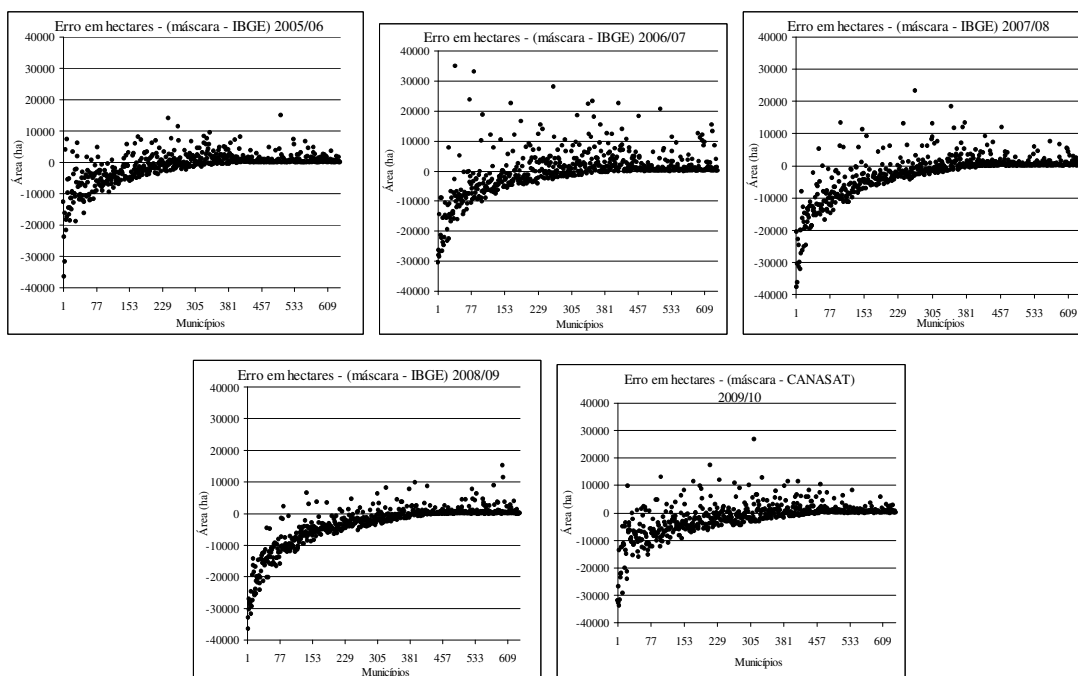


Figura 4.1.11. Diferença dos dados municipais no Estado de São Paulo da área de cana-de-açúcar estimada em relação aos dados do IBGE nos anos de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e em relação ao Canasat no ano de 2009/2010, sendo os municípios dispostos em ordem decrescente em relação à área dada como referência.

4.1.4. Conclusões

1. A utilização de imagens de NDVI oriundas do sensor Modis permitiu o mapeamento e monitoramento da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.
2. A análise do perfil temporal de NDVI através da transformação deste em perfil de coeficiente angular e variância permitiram, a partir da metodologia proposta, a identificação de perfis característicos de cana-de-açúcar.
3. A utilização do perfil temporal de coeficiente angular proposto permitiu a definição das datas das fases de cultivo presente nas alterações do índice de vegetação NDVI.
4. Devido à resolução espacial do Modis, verifica-se que qualquer alteração na dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar dentro do pixel altera a forma do perfil temporal de NDVI, impossibilitando a identificação.

5. O mapeamento considerando todos os municípios apresentou resultados satisfatórios, com boa precisão ($R^2 > 0,64$) e exatidão ($d > 0,82$), indicando que a metodologia, simples, é capaz de identificar áreas de cultivo de cana-de-açúcar e distinguir de outros alvos.

4.1.5. Referências

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens Modis. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.60, p.375-383, 2008.

BIGGS, T. W.; THENKABAIL, P. S.; GUMMA, M. K.; SCOTT, C. A.; PARTHASARADHI, G. R.; TURRAL, H. N. Irrigated area mapping in heterogeneous landscapes with Modis time series, ground truth and census data, Krishna Basin, India. **International Journal of Remote Sensing**. v.27 n.19 p.4245 – 4266, 2006.

CANASAT - **Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>. Acesso em 20 maio 2011.

CHEN, C. F.; CHEN, Q.; CHANG, L.; CHEN, C. Mapping Paddy Rice Using Multi-Temporal Modis Images. In: 29th ASIAN CONFERENCE OF REMOTE SENSING, 2008, Nov, 2008 Colombo, Sri Lanka. **Proceedings of ACRS**. Disponível em <<http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2008/Papers/TS%2017.2.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: **Cana-de-Açúcar - Safra 2008 - segundo levantamento**. Brasília, agosto, 2008. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/7d8871309d6409c9ba38739d4f59d434..pdf>. Acesso em: 24 maio 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: **Cana-de-Açúcar - Safra 2009 - segundo levantamento**. Brasília, setembro, 2009a. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/9579d4162da214d30b9e86a7881b447c..pdf>. Acesso em: 24 maio 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: **Cana-de-Açúcar - Safra 2009/2010 - segundo levantamento**. Brasília, dezembro, 2009b. Disponível em http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento2009_dez2009.pdf. Acesso em: 25 maio 2012.

FAOSTATS - **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS**. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

HIRD,J.N.; MCDERMID,G.J. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.248–258, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE): **Banco de Dados Agregados. Sistema IBGE De Recuperação Automática (SIDRA)**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20 maio.2011.

MA, M.; VEROUSTRAETE, F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI timeseries data for the Northwest of China. **Advances in Space Research**, v.37, p.835–840, 2006.

Modis - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. **Technical specifications**, 2010. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 28 jul. 2010.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor Modis para monitoramento da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba-PR. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 0547-0552. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0376.pdf> >. Acesso em: 30.maio.2011.

PETRINI, M. A.; ARRAES, C. L.; ROCHA, J. V. Comparação entre perfis temporais de NDVI e NDVI ponderado em relação ao uso da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba-PR. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 0452-0458. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1197.pdf>>. Acesso em: 20.julho.2012.

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.

TRIANA, C. A. R. Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches. **Energy Policy**, v. 39, n. 8, p. 4605-4613, 2011.

XAVIER A.C., RUDORFF, B. F. T., SHIMABUKURO, Y. E., BERKA L.M.S., MOREIRA M.A. Multi-temporal analysis of Modis data to classify sugarcane crop. **Inteational Journal of Remote Sensing**. v. 27, n.3-4, p.755-768, 2006.

XIAO X. M.; BOLES, S.; LIU J.; ZHUANG, D.; FROLKING, S.; LI, C. S.; SALAS, W. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal Modis images. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.480-492, 2005.

ZHANG, X., FRIEDL, M.A., SCHAAF, C.B., STRAHLER, A.H., HODGES, J.C.F., GAO, F., REED, B.C., HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using Modis. **Remote Sensing of Environment**. v.84, p.471–475, 2003.

4.2. Artigo 2: Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o estado de São Paulo

Rafael Aldighieri Moraes, Jansle Vieira Rocha, Glauco de Souza Rolim, Rubens A. Camargo Lamparelli, Marcel Motta Martins

Resumo - A agricultura possui dependência direta das condições do tempo e do clima. Estas afetam todas as etapas das atividades agrícolas, desde o preparo do solo até a colheita. De modo a acompanhar estes efeitos, são utilizados dados meteorológicos, que são provenientes de estações automáticas ou convencionais. Devido à dificuldade de acesso aos dados em tempo quase-real, problemas técnicos e a baixa densidade de estações meteorológicas no Brasil, a utilização de dados provenientes de modelos atmosféricos, como o do ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*) tem se mostrado como uma alternativa. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a precisão e acurácia do modelo atmosférico ECMWF pela comparação de dados decendiais simulados de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar aos observados por mapas interpolados de estações meteorológicas do estado de São Paulo no período entre 2005 e 2010. Esta comparação foi feita pixel a pixel possibilitando, além da análise geral para o estado, uma análise regional das estimativas feitas pelo ECMWF. Como resultado, observou-se que o modelo ECMWF simula satisfatoriamente (maior parte dos resultados com $R^2 > 0,60$; $d > 0,7$; $RMSE < 5^\circ C$ e $< 50mm$; $Es < 5^\circ C$ e $< 24mm$) os elementos meteorológicos para o estado de São Paulo.

Palavras-chave: dados meteorológicos, acurácia, precisão, índices estatísticos.

Evaluation of 10-day period precipitation, maximum and minimum air temperature data from the ECMWF model in Sao Paulo state

Abstract - The weather and climate has a direct influence in agriculture, it affects all stages of farming, since soil preparation to harvest. Meteorological data derived from automatic or conventional weather stations are used to monitor these effects. These meteorological data has problems like difficulty of data access and low density of meteorological stations in Brazil.

Meteorological data from atmospheric models, such as ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) can be an alternative. Thus, the aim of this study was to compare 10-day period precipitation, maximum and minimum air temperature data from the ECMWF model with interpolated maps from 33 weather stations in Sao Paulo state between 2005 and 2010 and generate statistical maps pixel by pixel. Statistical index showed spatially satisfactory (most of the results with $R^2 > 0.60$, $d > 0.7$, $RMSE < 5^\circ C$ and < 50 mm; $Es < 5^\circ C$ and < 24 mm) in period and ECMWF model can be recommended for use in the Sao Paulo state.

Keywords: meteorological data, accuracy, statistics index, ground truth.

4.2.1. Introdução

A utilização de dados agrometeorológicos é de suma importância para estudos que envolvem tanto a agricultura como as alterações climáticas em escala global. Segundo Pereira et al. (2002), das atividades econômicas, a agricultura é, sem dúvida, aquela com maior dependência das condições do tempo e do clima, pois as condições atmosféricas afetam todas as etapas das atividades agrícolas. Como as condições adversas do tempo são frequentes e muitas vezes imprevisíveis a médio e longo prazo, a agricultura constitui-se em atividade de grande risco.

Hodges, 1991 apud Hoogenboom, 2000, afirma que as variáveis críticas associadas com a produção agrícola são precipitação, temperatura do ar e radiação solar. Temperatura do ar é a principal variável que regula o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. A precipitação não controla diretamente nenhum processo na planta, porém é considerado um modificador que afeta indiretamente vários processos de crescimento e desenvolvimento vegetal (Hoogenboom, 2000). Essas variáveis, segundo Deppe et al. (2007), com diferentes escalas e resoluções, são necessárias, por exemplo, em modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de plantas. Long et al. (2006) afirmam que para poder realizar o monitoramento de culturas e estimativas de produtividade, é necessário se ter conhecimento do local de plantio e das condições vegetativas, de dados meteorológicos confiáveis e de modelos de estimativa de produtividade calibrados.

De um modo geral, os dados meteorológicos são provenientes de estações meteorológicas automáticas ou convencionais. O Brasil por suas dimensões continentais ainda não apresenta uma rede de estações meteorológicas que atenda às suas necessidades, sendo que em áreas mais desenvolvidas há um maior número do que em outras mais remotas (Pereira et al., 2002).

Neste sentido, a utilização de dados meteorológicos provenientes de modelos globais, como o do ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) tem se mostrado como uma alternativa aos problemas listados acima. Estes são disponibilizados gratuitamente pelo banco de dados meteorológicos do Joint Research Centre (JRC), centro de pesquisas da Comissão Européia. O ECMWF coleta informações meteorológicas de estações espalhadas por todo mundo, radares meteorológicos, satélites entre outras fontes. Essas informações são coletadas para as horas sinóticas (00, 06, 12, 18 UTC).

Estes dados são usados para produzir variáveis meteorológicas. São processados pela empresa alemã Meteo-Consult e posteriormente transferidos para o JRC, que os coloca à disposição de usuários, via internet. Por meio de equações que descrevem características atmosféricas, os dados são processados para formar um modelo fisicamente válido da atmosfera transformando em pontos distantes 0,25 graus de latitude e longitude, resultando em variáveis para o mundo inteiro (ECMWF, 2009; Person e Grazziani, 2007). Porém, utilizando-se somente o modelo atmosférico ECMWF como base de dados meteorológicos pode se incorrer em erros como a falta de acurácia para a região desejada. Isto se agrava quando se objetiva monitorar áreas agrícolas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as estimativas decendiais de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar feitas pelo modelo global ECMWF para o estado de São Paulo. Para tanto, foram comparadas estas estimativas com dados interpolados de 33 estações meteorológicas do Instituto Agrônômico (IAC) da Agência Paulista do Agronegócio (APTA).

4.2.2. Material e Métodos

O estudo foi realizado para o estado de São Paulo considerando os anos de 2005 a 2010. Foram utilizados dados observados de precipitação e temperaturas máxima e mínima do ar, proveniente de 33 estações agrometeorológicas do Centro Integrado de Informações

Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agrônomo (IAC) no estado de São Paulo com resolução temporal diária (Figura 4.2.1).

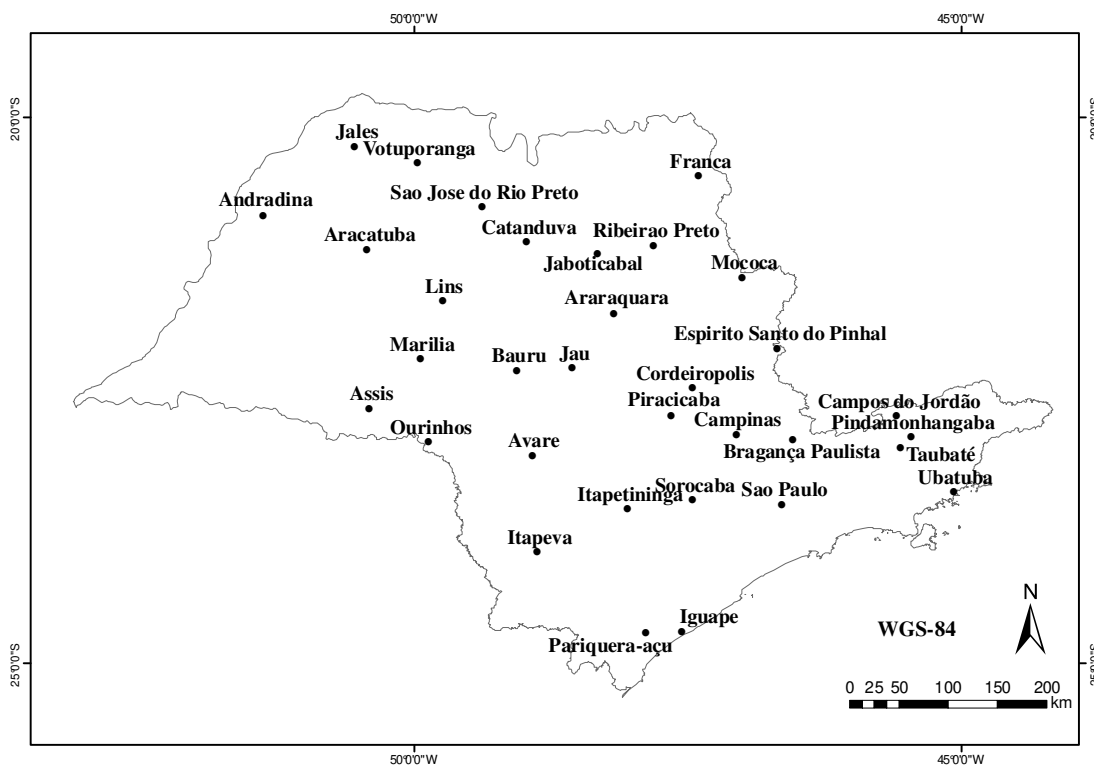


Figura 4.2.1. Distribuição das estações utilizadas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) no estado de São Paulo.

Como dados estimados, foram considerados os provenientes do modelo global ECMWF, com resolução temporal decendial (10 dias).

Na pagina eletrônica do JRC, é disponibilizado um banco de dados a partir de 1974. Esses dados são de precipitação (mm), radiação global ($\text{kJ/m}^2 \cdot \text{dia}$), temperatura do ar mínima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do ar máxima ($^{\circ}\text{C}$), balanço hídrico climático (mm) e deposição de neve (cm), com intervalos diários, decendiais e mensais (JRC, 2008).

Todas as fases do trabalho foram executadas utilizando o software ESRI ArcMap 9.3.1 e o Microsoft Excel. As etapas do trabalho são apresentadas no fluxograma na Figura 4.2.2.

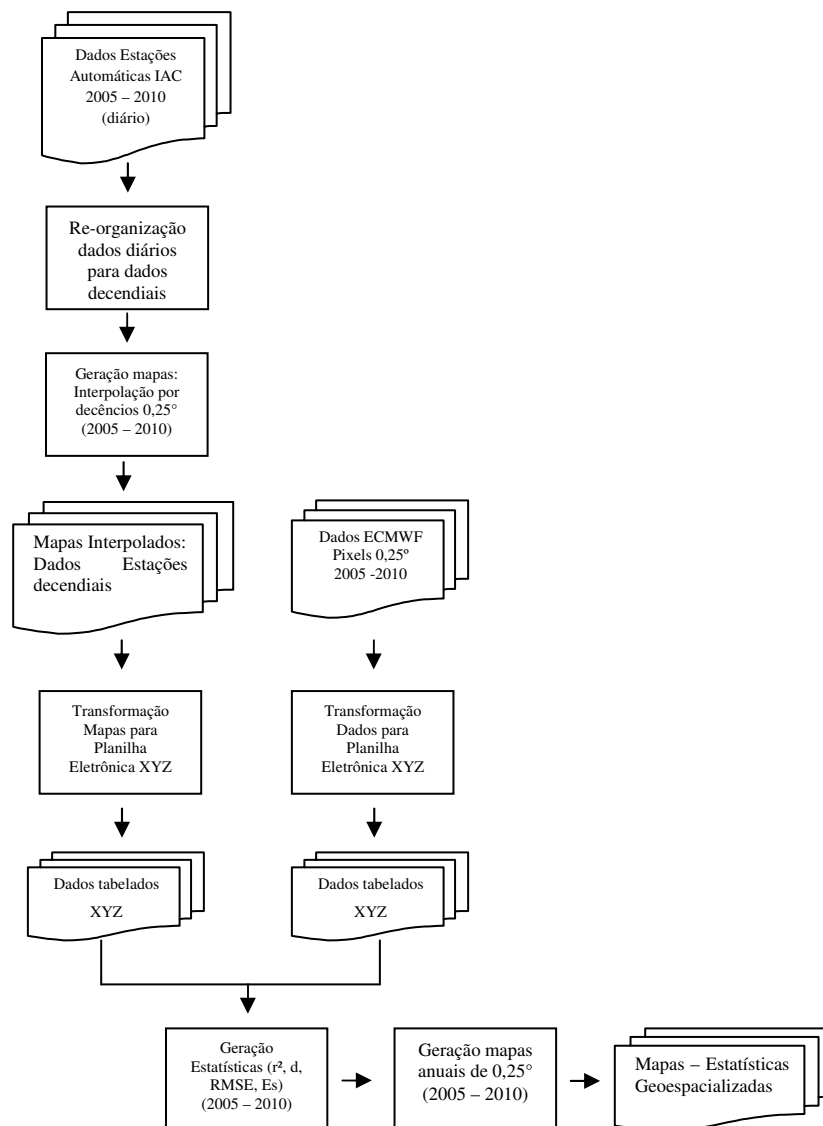


Figura 4.2.2. Fluxograma do trabalho.

Conforme o fluxograma, os dados do ECMWF foram dispostos espacialmente sobre o estado de São Paulo (figura 4.2.3) por pontos e organizados em forma de planilha eletrônica no formato XYZ. Neste, X e Y representa a latitude e longitude, respectivamente, e Z as variáveis precipitação e temperaturas do ar máxima e mínima.

Os dados das 33 estações, apresentados na Figura 4.2.1, foram reorganizados de resolução temporal diária para decendial, sendo a precipitação considerando o somatório de 10 dias e as temperaturas, a média de 10 dias. Após reorganizados, foi feita a interpolação,

considerando-se as 33 estações, utilizando o método de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Conforme Sodoudi et al. (2010), utilizando dados de precipitação de estações de superfície, não houve diferença significativa entre os métodos de interpolação testados, incluindo o IQD.

Depois de obtido os mapas interpolados decendialmente das estações, estes foram exportados em formato imagem, de modo que apresentasse a mesma resolução espacial do modelo ECMWF, ou seja, $0,25^\circ$. Essas imagens foram transformadas em planilhas de cálculo no formato de X (latitude), Y (longitude), Z(precipitação e temperatura do ar máxima e mínima).

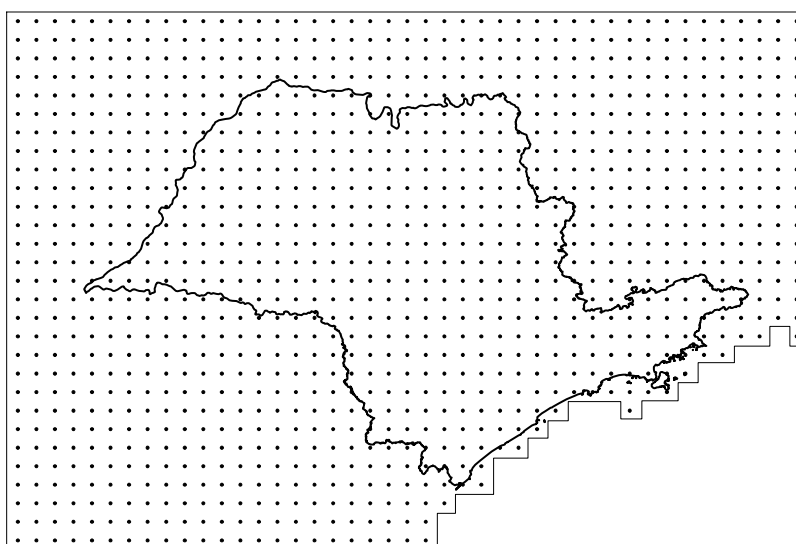


Figura 4.2.3. Pontos de dados utilizados do modelo ECMWF sobre o Estado de São Paulo.

Com os dados organizados com a mesma resolução temporal e espacial, foi possível a obtenção, para cada XY correspondente considerando o período total (2005 à 2010), dos índices de precisão pelo coeficiente de determinação (R^2) que indica o quanto da variação de Y pode ser explicado pela variação de X, variando de 0 a 1; o de exatidão (d), que expressa a distância dos valores de x e y em relação à reta 1:1, variando de 0 a 1 (Willmott, 1981), conforme equação 1; a raiz do erro médio quadrático (RMSE), que indica a magnitude média dos erros, sendo que quanto menor o valor, melhor a estimativa do modelo (varia de 0 a infinito), conforme equação 2 (Willmott e Matsuura, 2005) e o Erro Sistemático (Es), que

indica se há nos dados uma tendência de sub ou superestimativa e expressa a sua magnitude, influenciando na exatidão do modelo, conforme equação 3.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (pi - oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|pi - \bar{o}| + |oi - \bar{o}|)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (pi - oi)^2}{n}} \quad (2)$$

$$Es = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{ECMWF} - Y_{est})^2}{N}} \quad (3)$$

sendo, pi o valor estimado pelo modelo ECMWF; oi o valor observado; n o número de observações; $\bar{o}$ a média aritmética dos valores observados; Y_{ECMWF} os valores do modelo e Y_{est} os valores gerados por regressão linear simples entre os dados estimados e observados.

Assim, a partir das latitudes (X), longitudes (Y) e cada índice ou erro, os resultados foram exportados em formato shape (dados que possuem posição no espaço), representados por pontos e transformados em formato de imagem, com a mesma resolução do ECMWF (0,25°).

4.2.3. Resultados e Discussão

Após processamento dos dados estatísticos foram gerados os mapas com os índices espacialmente distribuídos. Estes são divididos em precipitação e temperatura do ar mínima e máxima para o período entre os anos de 2005 e 2010. Na Figura 4.2.4 temos os mapas gerados para a precipitação.

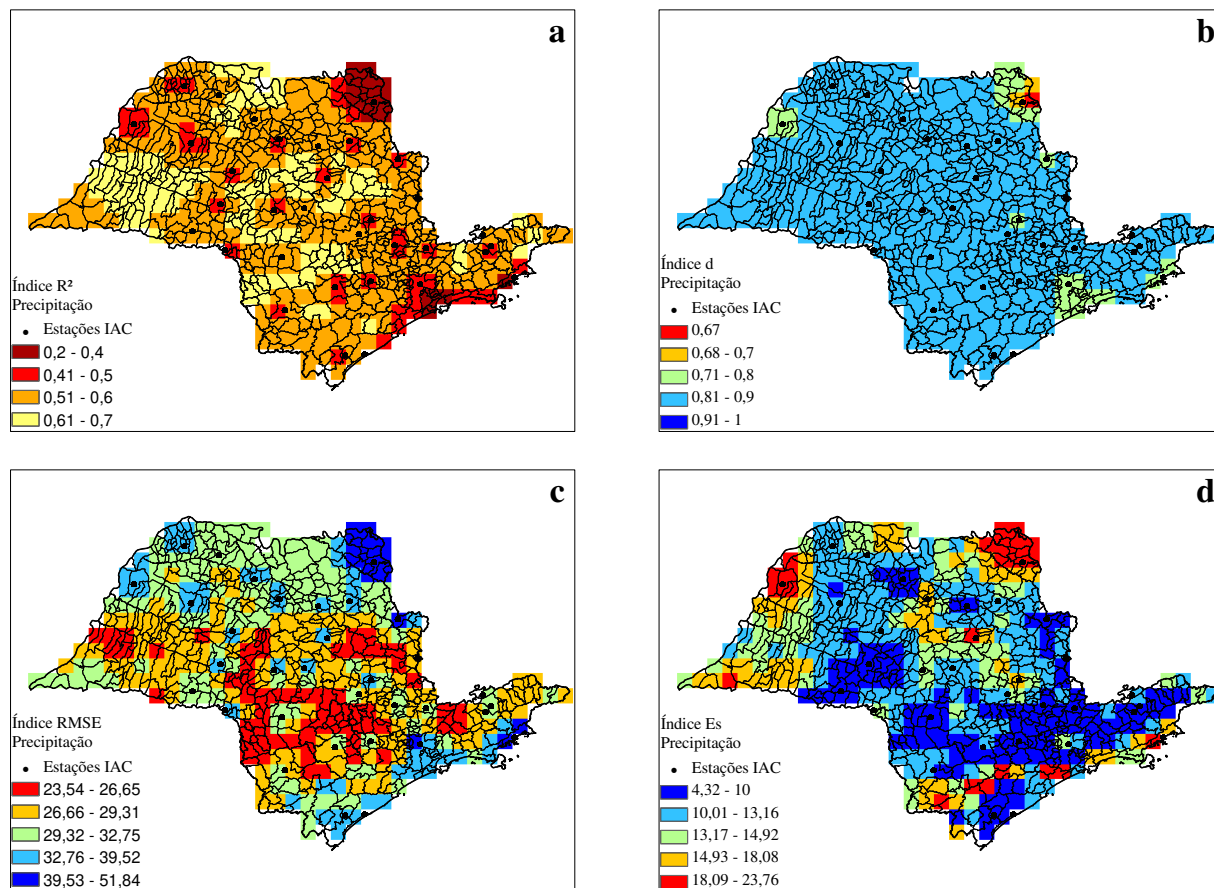


Figura 4.2.4. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de precipitação do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.

Verifica-se na Figura 4.2.4 que os dados do modelo ECMWF em relação à precipitação apresentou em grande parte do estado de São Paulo valores médios de precisão, com R^2 entre 0,50 e 0,70 (Figura 4.2.4a). Já o índice d apresentou na maioria das localidades valores entre 0,80 e 0,90, indicando elevada acurácia (Figura 4.2.4b). A magnitude média dos erros (Figura 4.2.4c) ficou entre 23,54 a 51,84 milímetros (mm/decêndio), sendo menor no interior do estado onde está presente a maioria das estações. Houve uma tendência positiva nos dados estimados de valor máximo 23,76 mm/decêndio, porém em grande parte com máximo de 13,16 mm (Figura 4.2.4d), mostrando uma superestimação dos valores estimados

para precipitação no período considerado. As piores avaliações ocorreram a nordeste do estado, próximo à estação de Franca.

Serio et al. (2006), objetivou-se em validar os valores de precipitação do modelo ECMWF em relação a dados de estações na Argentina, e concluiu que apesar dos resultados não terem sido bons, não foram encontrados erros sistemáticos e os valores do índice RMSE foram próximos deste estudo. Porém, Deppe et al. (2006), procurando validar dados de precipitação do modelo em relação a estações no Paraná, observou que os dados possuem a mesma tendência, e que os dados poderiam ser utilizados para aplicações na escala temporal decenal.

A legenda dos mapas de precipitação foi construída automaticamente, variando nos mapas das Figuras 4.2.4a e 4.2.4b a cada 0,1 e para os mapas das Figuras 4.2.4c e 4.2.4d utilizando a metodologia de classificação Jenks (Esri, 2012), em que cada intervalo é determinado pelo ponto natural de quebra de cada conjunto de dados, ou seja, dentro de cada grupo há uma pequena variância e entre os grupos uma grande variância.

Nas Figuras 4.2.5 e 4.2.6 temos os mapas gerados a partir da comparação das temperaturas do ar mínima e máxima entre as estações e o modelo ECMWF, respectivamente. Para a temperatura mínima, o resultado em relação ao R^2 (Figura 4.2.5a) foi maior que 0,80 para quase a totalidade do estado, sendo que a faixa norte do estado ficou entre 0,70 e 0,80 e o restante entre 0,81 e 0,90. O índice d (Figura 4.2.5b) apresentou valores maiores que 0,91 para quase a totalidade do estado; já o índice RMSE (Figura 4.2.5c) apresentou valores de no máximo 3,49°C e um erro sistemático (Figura 4.2.5d) com intervalo máximo de 1,49 a 3,18°C para poucas áreas, sendo que em grande parte o RMSE foi menor que 1°C.

Para a temperatura máxima (Figura 4.2.6), os resultados mostraram uma baixa precisão na faixa centro-norte do estado com valores de R^2 (Figura 4.2.6a) variando entre 0,28 a 0,50. Já na faixa centro sul, os resultados apresentaram valores maiores do que 0,51. O índice d (Figura 4.2.6b) apresentou valores maiores que 0,71 em grande parte das áreas avaliadas. A magnitude dos erros expressa pela RMSE (Figura 4.2.6c) apresentou resultados menores que 4,9°C, demonstrando uma boa estimativa em relação a média dos dados das estações. O erro sistemático (Figura 4.2.6d) atingiu valores de no máximo 4,52°C na faixa sul do estado, porém em grande parte da área agricultável do estado apresentou valores de no

máximo 2,85°C. A metodologia de construção das legendas nas Figuras 4.2.5 e 4.2.6 foi a mesma utilizada para os mapas da Figura 4.2.4.

Blain et al. (2006) compararam dados de temperatura do ar máxima e mínima e precipitação obtidos de estações de superfície com dados do modelo ECMWF no estado de São Paulo. A precipitação foi avaliada de forma pontual e devido a grande variabilidade espacial não foi possível fazer a análise quantitativa. Já os dados de temperatura máxima e mínima do ar, apresentaram resultados satisfatórios e que após ajustes considerando os erros, foram usados em um modelo de estimativa de produtividade. Concluíram que os dados do ECMWF podem ser usados para a estimativa da produtividade da soja no estado de São Paulo.

Melo e Fontana (2007) com objetivo de comparar a utilização de dados de estações de superfície e dados do ECMWF, aplicaram os dados diretamente sobre um modelo agrometeorológico-espectral de rendimento da soja. Analisando os resultados concluíram que os dados do ECMWF podem ser utilizados como opção para o cálculo de estimativa do rendimento da soja na região maior produtora do Rio Grande do Sul.

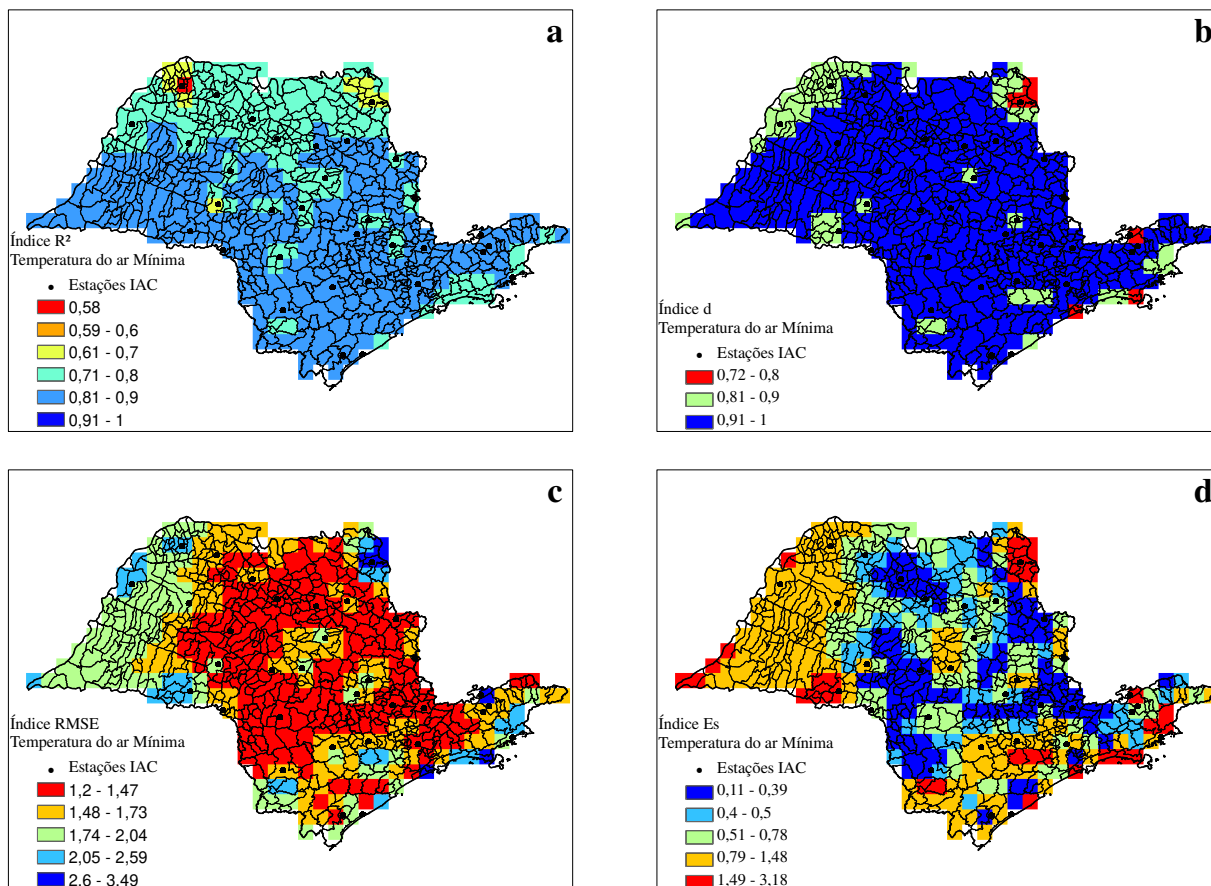


Figura 4.2.5. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de temperatura do ar mínima do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.

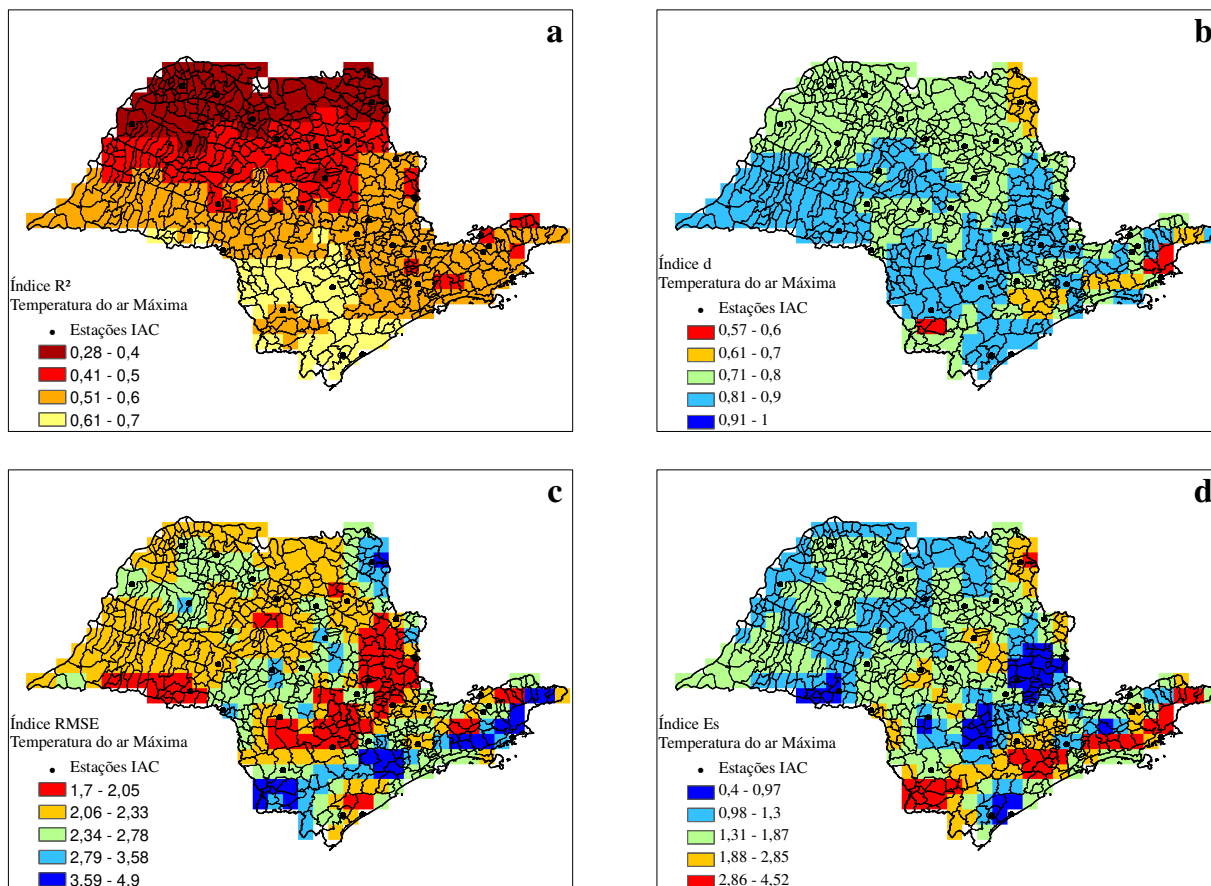


Figura 4.2.6. Índices de precisão (R^2) [a], de exatidão (d) [b], RMSE [c] e Es [d] distribuídos espacialmente sobre o estado de São Paulo a partir de dados de temperatura do ar máxima do modelo ECMWF e mapas interpolados de estações de superfície do IAC para os anos de 2005 a 2010.

4.2.4 Conclusões

Apesar do número limitado de estações meteorológicas, sendo este considerado a fonte dos dados observados, os resultados se mostraram satisfatórios espacialmente, de acordo com os índices calculados. A representação da realidade meteorológica do modelo ECMWF nos anos considerados, para o estado de São Paulo, em relação à precipitação e temperatura do ar mínima e máxima e na resolução padrão do modelo de $0,25^\circ$, apresentou ser viável sua utilização. Assim, conclui-se com este trabalho que é possível utilizar os dados oriundos do modelo global ECMWF de precipitação e temperatura do ar máxima e mínima para o estado de São Paulo.

4.2.5 Referências

- BLAIN, G.C.; ROLIM, G.de S.; CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O. Relação entre os dados meteorológicos ECMWF preparados pelo JRC-MARS-FOOD e dados de superfície para estimativa de produtividade de soja no estado de São Paulo, Brasil. p.61-68. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.
- DEPPE, F.; MARTINI, L.; LONHMANN, M.; ADAMI, M. Validation studies of ECMWF precipitation data with observed SIMEPAR ground data (meteorological stations). p.83-92. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.
- DEPPE, F.; MARTINI, L.; LONHMANN, M.; CALVETTI, L.; ADAMI, M. Comparação de estimativas de precipitação com dados observados (estações meteorológicas). In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 2007. Florianópolis/SC. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.3319-3326, 2007.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, Inc.; Knowledge Base - **Technical Articles: FAQ “What is the Jenks optimization method?”** Disponível em: <http://support.esri.com/en/knowledgebase/techarticles/detail/26442>. Acesso em 19 de março de 2012.
- HODGES, T. Predicting Crop Phenology. **CRC Press**, Boca Raton, FL. 1991.
- HOOGENBOOM, G.. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.103, pp. 137-157, 2000.
- JRC - **Joint Research Centre**. Dados meteorológicos simulados pelo modelo do ECMWF. Disponível em: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/About-us/FOODSEC/Data-Distribution>. Acesso em 30 de março de 2011.
- LONG, M.E.F.; HURTADO, R.H.; MURPHY, G.M. Validación de lãs temperaturas máximas y mínimas diarias de la región pampeana estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. p.37-44. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND

FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South América Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C. Estimativa do rendimento de soja usando dados do modelo do ECMWF em um modelo agrometeorológico-espectral no Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 279-286. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.16.16/doc/279-286.pdf>>. (acesso em: 05 Agosto 2012).

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

PERSON, A.; GRAZZIANI, F. **User guide to ECMWF forecast products**. Meteorological Bulletin M3.2, version 4, mar, 2007.

SERIO, L.; SPESCHA, L.; MURPHY, G.M. Validación de las precipitaciones decádicas de la región pampeana na estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. p.45-52. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

SODOUDI, S.; NOORIAN, A.; GEB, M.; REIMER, E. Daily precipitation forecast of ECMWF verified over Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 39-51, 2010.

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

WILLMOTT, C. J., MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82, 2005.

4.3. Artigo 3: Determinação do total acumulado de precipitação, radiação global, evapotranspiração de referência e graus-dias oriundos do ECMWF entre as fases de crescimento e colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Resumo: O conhecimento da influência da variabilidade climática no período entre o crescimento e colheita da cana-de-açúcar é de grande importância para o estado de São Paulo, pois afeta diretamente a produtividade. O sensor MODIS, devido a sua resolução espacial e temporal, permite o monitoramento da variabilidade do vigor vegetativo na superfície terrestre e, por conseguinte a geração de perfis temporais deste comportamento. Dados agrometeorológicos obtidos pelo modelo ECMWF, além de gratuitos e de fácil acesso, apresentam boa representatividade da realidade. Neste trabalho, foram utilizados intervalos de crescimento e colheita obtidos pela seleção de perfis temporais de NDVI com comportamento de cana-de-açúcar. A partir destes foram acumulados, dentro de cada período, a soma da precipitação pluvial, evapotranspiração de referência, radiação global e comprimento do período em dias. Além disso, foi feito o somatório de graus-dia da cana-de-açúcar. Todos os resultados foram apresentados em formato de mapa na resolução espacial do sensor MODIS de 250 metros. A análise dos resultados mostrou que foi possível identificar a variabilidade espacial das variáveis climáticas e sua relação com a realidade apresentada por órgãos oficiais.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, variáveis agrometeorológicas, ECMWF, MODIS.

Determination of total accumulated rainfall, global radiation, evapotranspiration and degree-days from the ECMWF between the growing and harvesting sugarcane in Sao Paulo state

Abstract: The climate variability between the growth and harvesting of sugarcane is very important to Sao Paulo state, because it directly affects productivity. The MODIS sensor has characteristics like spatial and temporal resolution that can be applied to monitoring of vegetative vigor variability in the land surface and then, temporal profiles generation. Agrometeorological data from ECMWF model are free and easy to access and have a good representation of reality. In this work, we used period between sugarcane growth and harvest from temporal profiles selecting of NDVI behavior. These periods were used to accumulated

precipitation, evapotranspiration, global radiation and period length (days). Besides was made the sum of degree-days. The periods accumulated were presented in map format on MODIS spatial resolution of 250 meters. The results showed the spatial variability of climate variables and the relationship to the reality presented by official data.

Key-words: sugarcane, agrometeorological variable, ECMWF, MODIS.

4.3.1. Introdução

Atualmente, o Brasil é responsável por aproximadamente 43% da produção de cana-de-açúcar no mundo (FAOSTATS, 2012), sendo o estado de São Paulo responsável por 59,5% deste total (IBGE, 2012). Este cultivo é voltado para a produção de açúcar e etanol, sendo este último uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis (Triana, 2011).

As condições climáticas são o principal responsável pela variabilidade da produção agrícola. Dentre os fatores climáticos, a temperatura, a radiação solar e a quantidade de chuva são fatores determinantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (Marin et al., 2008). Dessa forma, o conhecimento da variação destas variáveis durante o período de cultivo da cultura, associado a modelos agrometeorológicos de rendimento, permite análises da redução da produtividade (Pereira et al., 2002).

Geralmente os dados agrometeorológicos são provenientes de estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Porém, com frequência, esses dados podem apresentar erros ou serem de difícil acesso. Assim, dados agrometeorológicos provenientes de modelos globais como o ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) podem vir a ser uma alternativa.

Além do monitoramento agrometeorológico, a identificação da dinâmica do processo de cultivo agrícola é de grande importância. Uma das maneiras para tal é o uso de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um sensor a bordo do satélite *Terra* (EOS AM) e *Aqua* (EOS PM) adequado ao monitoramento de coberturas vegetais. Xavier et al. (2006) e Aguiar (2008) mostraram que é possível a identificação e o monitoramento da cana-de-açúcar a partir do sensor MODIS. Moraes et al. (2012a), a partir de análises de imagens multi-temporal de

NDVI deste sensor, identificaram e classificaram áreas de cana-de-açúcar nas suas respectivas fases de cultivo.

Assim, utilizando-se de intervalos identificados, na resolução de 250 metros a partir do sensor MODIS, de crescimento e colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo o objetivo deste trabalho foi quantificar, utilizando dados do ECMWF, o somatório de precipitação pluvial, evapotranspiração de referência e radiação global. Além disso, foi feito a partir de dados de temperatura média a contabilização de graus-dia para cada período e a respectiva duração do número de dias do ciclo entre o crescimento e colheita. Todos estes resultados foram apresentados em formato de mapas oferecendo uma visão espacial dos resultados obtidos.

4.3.2. Material e Métodos

O estudo foi realizado para o estado de São Paulo, considerando períodos entre os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010. Cada período inicia no mês de maio do primeiro ano e finaliza no mês de novembro do ano seguinte.

Para este trabalho foram utilizados dados meteorológicos de radiação global ($\text{kJ dia}^{-1} \text{m}^{-2}$), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluvial (mm) e evapotranspiração de referência (mm) provenientes do modelo global ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). Este possui resolução espacial de $0,25^{\circ}$ (grau) e temporal de 10 dias e estão em formato *shape* ponto. Este modelo considera em seus cálculos dados de estações meteorológicas espalhadas pelo mundo, radares meteorológicos, satélites, entre outras fontes. Estas informações utilizadas em equações, descrevem as características da atmosfera e produzem como resultado, parâmetros meteorológicos e agrometeorológicos, em nível mundial. Estes parâmetros são processados e transferidos, via a empresa Meteo-Consult, para o Joint Research Centre (JRC), Centro de Pesquisas da Comissão Européia, que os disponibiliza gratuitamente na internet (Person e Grazziani, 2007). Moraes et al. (2012b), comparou dados de temperatura máxima e mínima e precipitação, oriundas de estações de superfície com dados do modelo ECMWF para o estado de São Paulo e encontrou resultados satisfatórios maior parte dos resultados com $R^2 > 0,60$; $d > 0,7$; $\text{RMSE} < 5^{\circ}\text{C}$ e $< 50\text{mm}$; $\text{Es} < 5^{\circ}\text{C}$ e $< 24\text{mm}$, podendo assim ser utilizado de forma direta.

Além dos dados meteorológicos, foram utilizadas quatro máscaras com o mapeamento da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 e máscaras de mapeamento da variação temporal das datas de crescimento e colheita para cada pixel a partir de dados de NDVI do sensor MODIS, produto MOD13Q1, no formato TIFF, resolução espacial de 0,002299° (grau) e temporal de 16 dias, conforme descrito por Moraes et al. (2012a). Assim, para cada intervalo considerado, temos 35 máscaras da variação temporal das datas de crescimento até a colheita da cana-de-açúcar, onde cada pixel tem uma imagem/data de início e uma imagem/data de fim, iniciando no crescimento e terminando na colheita.

Sabendo-se que a resolução temporal dos dados meteorológicos é a cada 10 dias e os dados das máscaras são a cada 16 dias, foi feita a adequação dos dados do modelo ECMWF para esta resolução. Desta maneira os dados, primeiramente disponibilizados em decêndios, foram transformados em diários, onde os valores de temperatura média do ar foram repetidos a cada dia; a precipitação, a radiação global e a evapotranspiração foram divididos por 10 e repetidos na resolução diária. Assim, bastou refazer para a temperatura, a média, selecionando os valores a cada 16 dias; para a precipitação, radiação global e evapotranspiração de referência foram feitos o somatório e ao final os dados foram exportados para o formato shape ponto.

Todas as fases do trabalho foram executadas utilizando planilhas eletrônicas no Microsoft Excel, o software ENVI 4.5 (*The Environment for Visualizing Images*) a partir da geração de rotinas em IDL (*Interactive Data Language*) versão 7.0. e o ESRI ArcMap 9.3.1 para a geração dos mapas. As etapas do trabalho são apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 4.3.1).

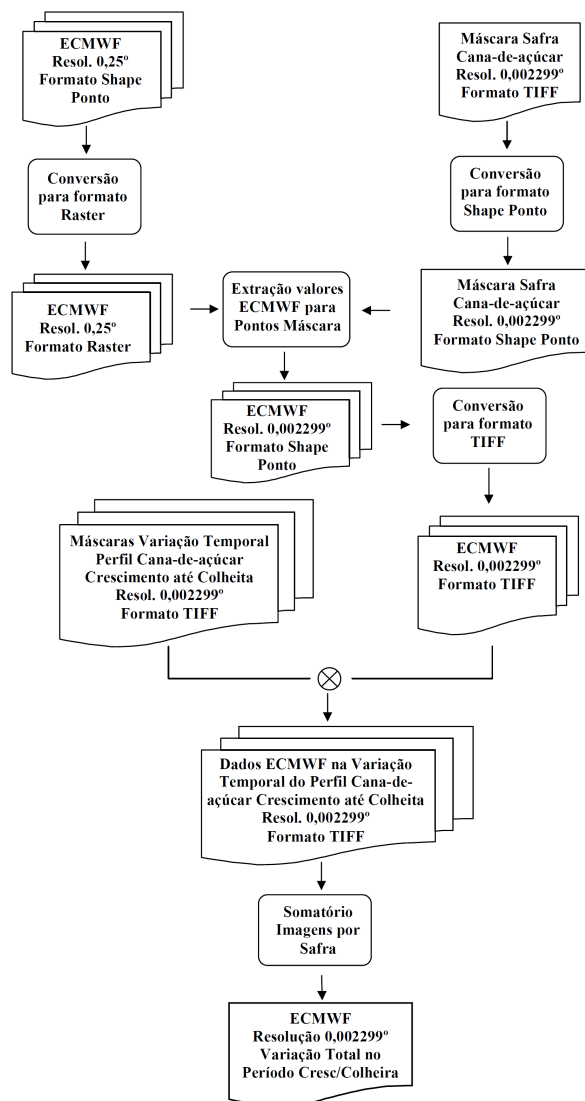


Figura 4.3.1. Fluxograma do trabalho.

Após transformação da resolução temporal dos dados do ECMWF foi feita a transformação da resolução espacial destes para a resolução das máscaras de 0,002299° em formato TIFF. Para isso, inicialmente foram transformados os dados do ECMWF shape ponto para formato imagem raster em 0,25°.

A transformação destes valores na resolução espacial de 0,002299° foi feita transformando cada máscara de cana-de-açúcar, que possui a resolução espacial requerida e formato TIFF, para shape ponto. A partir de cada localização destes pontos, foram extraídos os

valores localizados destes sobre cada imagem raster para cada variável agrometeorológica. Após este procedimento, com cada ponto shape possuindo o valor do raster do ECMWF, este foi novamente transformado em formato TIFF.

As máscaras da variação de comprimento do perfil temporal determinam as datas de crescimento até a colheita da cana-de-açúcar, no período considerado. Estas, apresentam valor 1 (um) quando positivo para cana-de-açúcar e 0 (zero) para ausência. A máscara inicial representando a data da primeira imagem do produto MOD13Q1 do mês de maio apresenta parte de pixels onde a cana-de-açúcar começou o crescimento. Na imagem adiante são apresentados novos pixels representando onde se iniciou o crescimento da cana-de-açúcar na data desta imagem, além dos mesmos apresentados na máscara anterior e assim por diante de forma acumulativa. É considerado como crescimento da cana-de-açúcar até a 14ª imagem onde a 15ª apresenta todos os pixels positivos para cana-de-açúcar, segundo a classificação da máscara.

A partir da imagem 16ª é iniciada a exclusão de pixels onde representam a colheita, e este será igual a zero até a última imagem. Esta exclusão segue de forma cumulativa entre os meses de janeiro e novembro, ou seja, da imagem 16ª até a 35ª.

Com o perfil temporal completo do crescimento até a colheita da cana-de-açúcar representado pelo valor 1 em cada pixel, estas foram multiplicadas pelas imagens obtidas anteriormente para cada variável agrometeorológica, nas mesmas datas. Assim, foram obtidos perfis temporais das variáveis agrometeorológicas do ECMWF dentro do intervalo de um ciclo de cana-de-açúcar, do crescimento até a colheita no período considerado no estudo, excluindo os outros pixels pelo valor zero das máscaras.

De posse dos perfis temporais de cada variável agrometeorológica, foi trabalhado de modo a obter o total acumulado de precipitação pluvial, radiação global e evapotranspiração de referência. Assim foi feito o somatório de todas as imagens obtidas na multiplicação citada anteriormente. Além disso, foi obtido o total de duração do ciclo em dias, de cada pixel desde o crescimento até a colheita. Para isto foi feito o somatório das máscaras dos perfis temporais de crescimento/colheita (que possuem valores 0 e 1) e depois de obtida a imagem somatório, cada pixel foi multiplicado por 16, representando o total de dias de cada imagem representada.

Para a obtenção do total de graus-dia para a cana-de-açúcar no intervalo de crescimento e colheita de cada pixel, foi considerada a equação 1:

$$GD = (T_{média} - T_{base}) \quad (1)$$

em que:

GD - graus-dia

$T_{média}$ - temperatura média do ar no período de 16 dias (°C)

T_{base} - temperatura base para o desenvolvimento da cana-de-açúcar igual a 18°C (Bachi & Souza, 1978 apud Teruel et al., 1997)

Para valores de GD onde fossem negativos, foram considerados iguais à zero na data considerada da imagem em questão. Assim, depois de obtido o perfil temporal das imagens GD, foi feito o somatório das imagens de modo a obter o total de GD para o ciclo.

4.3.3 Resultados e Discussão

Após o somatório das imagens foram obtidos os totais acumulados, para o intervalo entre as datas de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para cada pixel identificado, de precipitação, evapotranspiração de referência e radiação global, conforme figura 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 respectivamente. Na figura 4.3.5 é apresentado a duração do intervalo entre o crescimento e a colheita na escala de número de dias e na figura 4.3.6 o somatório de graus-dias para cada período.

No somatório da precipitação (figura 4.3.2), verificou-se para a cana-de-açúcar colhida no ano de 2007 um predomínio dos valores acumulados entre 1500 e 1750 milímetros na maior parte da máscara. Para o intervalo entre 2007 e 2008, apesar de haver um acumulado de precipitação entre 1500 e 2000 milímetros na parte norte do estado, verificou-se uma diminuição na parte central e centro-oeste entre 1000 e 1500 mm. Na colheita ocorrida em 2009, apenas a parte nordeste do estado apresentou um acumulado entre 1250 e 1500 sendo o restante entre 750 e 1250 milímetros. Já na colheita de 2010 a chuva foi menor no nordeste do estado (750 a 1250 mm) e maior no restante (1250 a 1750 mm).

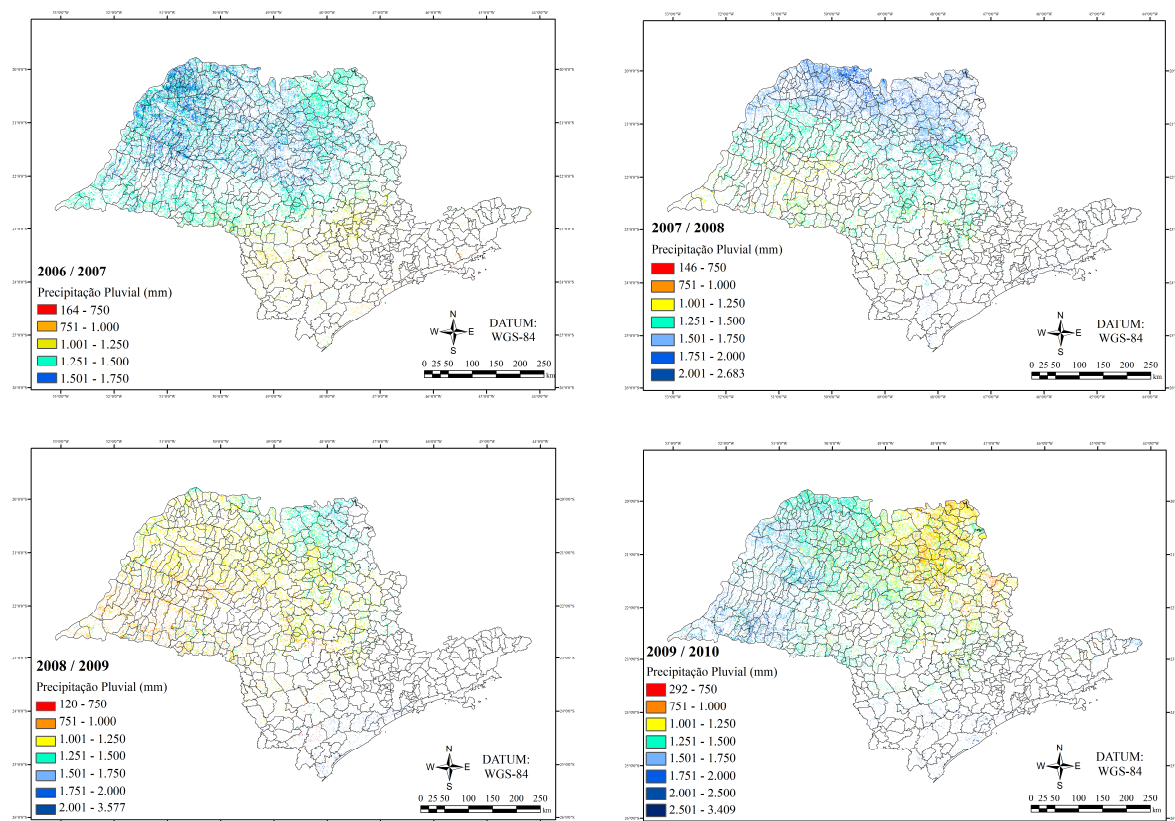


Figura 4.3.2. Total acumulado para a precipitação nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

A evapotranspiração de referência acumulada (figura 4.3.3), oriunda do modelo ECMWF, apresenta para os anos do estudo valores próximos ou menores ao da precipitação. Porém para o ano de 2006/2007 a parte noroeste do estado apresentou acumulado maior em alguns pontos de evapotranspiração de referência que a precipitação, chegando a 2000 milímetros. Nesta região foi onde o acumulado de radiação global (figura 4.3.4) atingiu os maiores valores, entre 5.000.000 e 10.000.000 kJ m^{-2} . No entanto, esta energia radiante, de um modo geral, variou com acumulados entre 2.500.000 e 7.500.000 kJ m^{-2} .

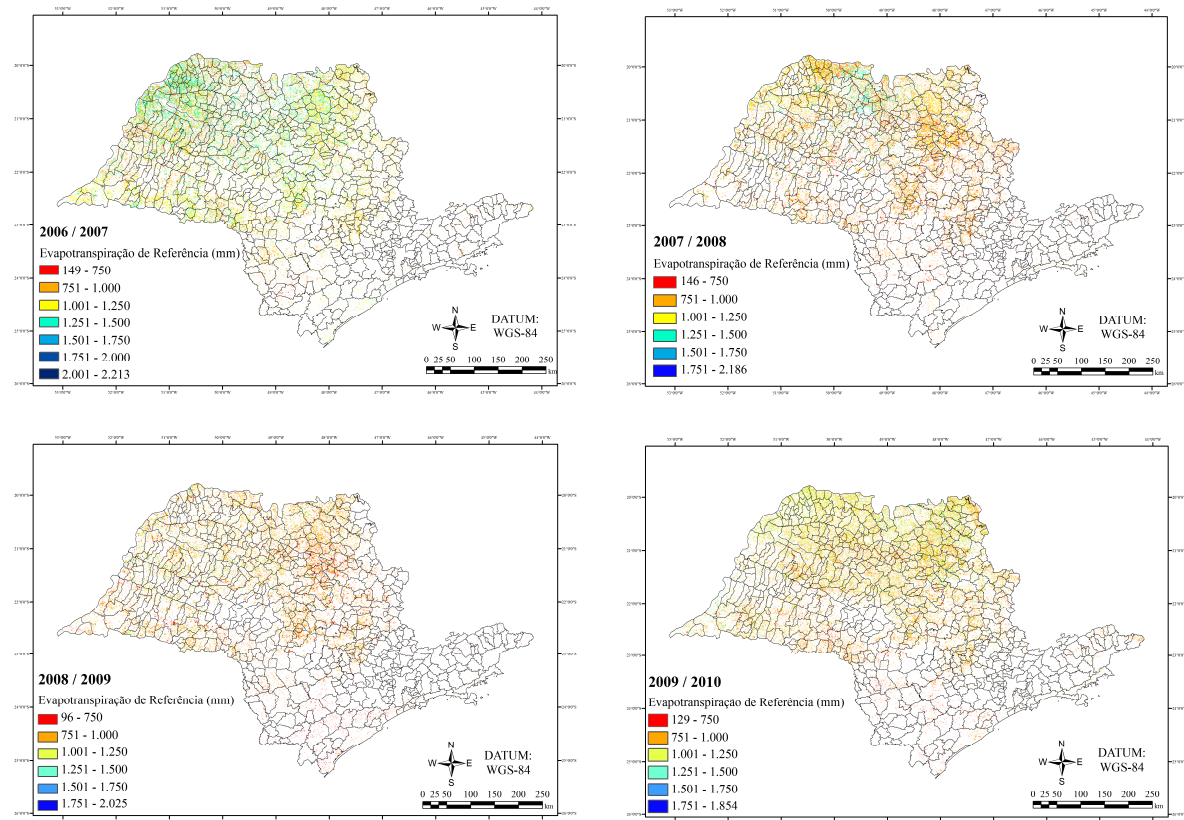


Figura 4.3.3. Total acumulado para a evapotranspiração de referência nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

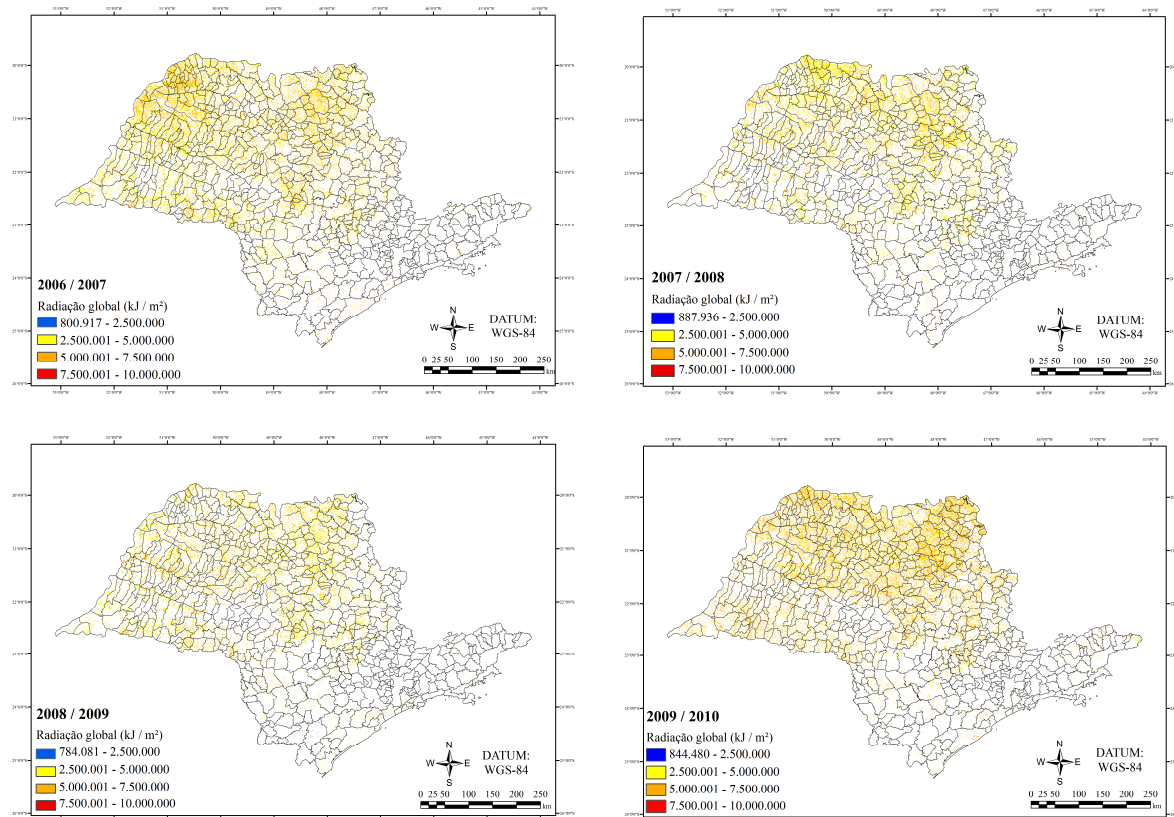


Figura 4.3.4. Total acumulado para a radiação global nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

Segundo Doorenbus & Kassan (1979), a cana-de-açúcar possui necessidade hídrica entre 1500 e 2500 milímetros, distribuídos igualmente durante o ciclo de cultivo. Variações abaixo deste intervalo podem afetar a produtividade. Além disso, segundo Rodrigues (1995), por ser uma planta C4, é considerada altamente eficiente em converter energia radiante em energia química; e a temperatura do ar é de extrema importância, pois exerce grande influência no crescimento dos colmos, sendo uma faixa de temperatura ideal entre 25 e 35°C.

Dessa forma, o acumulado de radiação global não houve grandes alterações, mas levando em consideração à necessidade hídrica, a partir do período 2007/2008 a precipitação diminui até o período 2009/2010. O período crítico foi o de 2008/2009 onde ficou em grande parte cerca de 250 milímetros abaixo do mínimo recomendado. Este resultado confirma a justificativa dada por MORAES et al., (2012a) onde a área mapeada em 2008/2009 foi menor,

pois conforme os autores, o mapeamento foi feito analisando a forma dos perfis temporais de NDVI, sendo selecionados os que apresentassem comportamento de cultivo de cana-de-açúcar. Este perfil, descaracterizado em sua forma, seja pela diminuição do vigor vegetativo ou áreas colhidas de forma incompleta, prejudicaram o mapeamento.

De acordo com dados da CONAB (2009a; 2009b), na colheita no ano de 2009, houve uma quantidade de chuvas acima do normal nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, cujo ritmo da moagem é mais intenso e a cana oferece maior concentração de sacarose, afetando o andamento da moagem com interrupções na colheita e redução na concentração de ATR (Açúcares Totais Recuperáveis). Além disso, houve cerca de 20 milhões de toneladas de cana que não foram colhidas (cana bisada), ficando para o próximo período. Conforme UDOP (2012), a produtividade para os anos de estudos para a região centro-sul do Brasil, apresentaram valores de 75,4 ton/ha para 2006/2007, 84,9 ton/ha para 2007/2008 e 81,2 para 2009/2010. Para o período de 2008/2009 foi de 69,1 ton/ha mostrando uma queda relativamente grande. O atraso em 2008 e os problemas na colheita em 2009 influenciaram também na duração do ciclo do período de crescimento e colheita. De acordo com a figura 4.3.5, a colheita em 2007 seguiu normalmente com maioria maiores que 360 dias. Porém em 2008 há um encurtamento desse ciclo, agravando em 2009 e só voltando a aumentar na colheita em 2010.

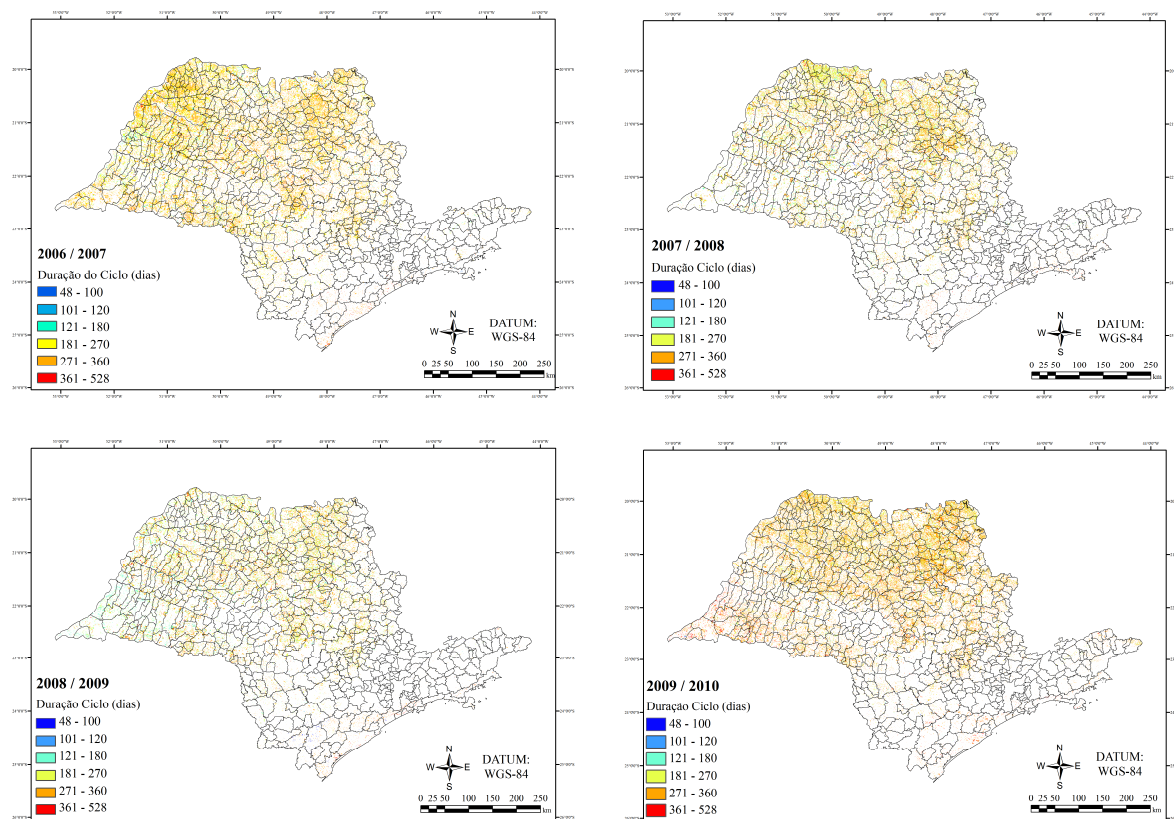


Figura 4.3.5. Total acumulado de dias nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

No período de 2006/2007, segundo CONAB (2007) não houve problemas relativos à produção de cana-de-açúcar destinados a indústria sucroalcooleira. Já para a colheita em 2008, elevados níveis de precipitação pluviométrica no período inicial ocasionaram atraso no cronograma de moagem da cana-de-açúcar e por fim menor volume colhido (CONAB, 2008). Na colheita de 2010 (CONAB, 2010), o clima não prejudicou a cultura, favorecendo tanto as operações de colheita como a concentração de ATR. Porém, a falta de chuvas no período de crescimento prejudicou a brotação e o desenvolvimento da cana para a colheita em 2011, encurtando o período da safra (CONAB, 2011).

Na figura 4.3.6, temos contabilizado o somatório de graus-dia para cana-de-açúcar considerando uma temperatura basal de 18°C. Almeida et al. (2008) analisando o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades

térmicas para Alagoas, encontrou valores entre 1500 e 2015 GD para cana-planta e 950 e 1800 GD na cana-soca. Esses valores foram semelhantes aos encontrados neste trabalho, ressaltando que estes foram acompanhados pelos problemas apresentados a partir da colheita de 2008 onde valores de 2000 GD até superior a 2500 GD no período de 2006/2007 foram decaindo nas colheitas de 2008 e 2009, voltando a aumentar apenas no período de 2009/2010.

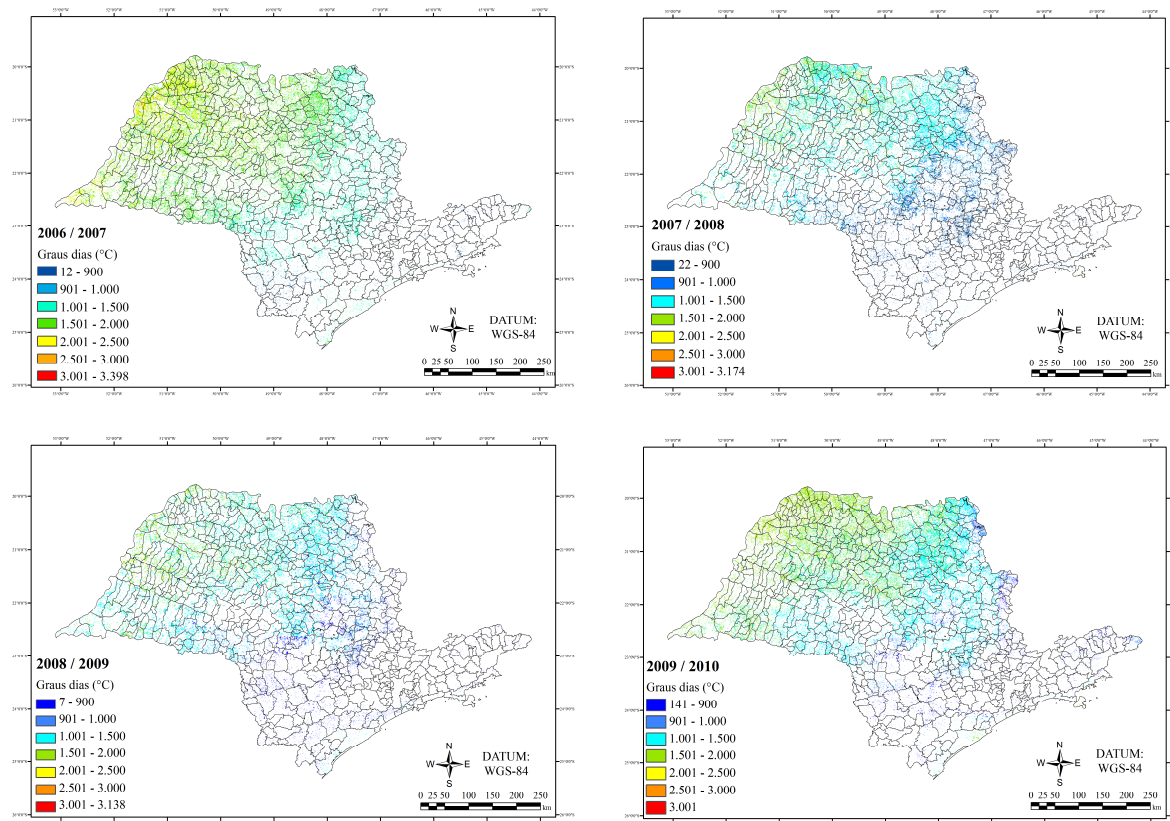


Figura 4.3.6. Total calculado de graus-dias nos intervalos de crescimento e colheita da cana-de-açúcar para os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 obtida a partir da metodologia aplicada.

Marin et al. (2008), analisando a variabilidade espacial e temporal da eficiência produtiva da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, concluíram que os elementos climáticos explicaram 43% desta variabilidade enquanto que o solo 15%. Assim, verifica-se que a partir das análises anteriores, há alta dependência da cultura da cana-de-açúcar em relação à variabilidade climática, tanto no sentido agrônomo como na fase agrícola da colheita.

4.3.4. Conclusões

Considerando os mapas gerados neste trabalho, a visão espacial, na escala estadual, da variabilidade da precipitação pluvial, evapotranspiração de referência e radiação global permitiu fazer análises condizentes com a realidade, utilizando apenas imagens do sensor MODIS e dados agrometeorológicos oriundo do modelo ECMWF. A partir da duração do ciclo foi possível perceber o impacto de sua redução, juntamente com a precipitação, na safra posterior. O conhecimento de graus-dia para cana-de-açúcar de forma espacializada oferece meios de visualização do consumo de energia térmica da cana em cada região do estado. Assim, a partir desses resultados, sugere-se para trabalhos futuros, o relacionamento destes com a produtividade da cana-de-açúcar, gerando modelos de estimativa.

4.3.5. Referências

- ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v32n5/13.pdf>. Acesso em 14 maio 2012.
- AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.60, p.375-383, 2008.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2007/2008 - segundo levantamento. Brasília, agosto, 2007. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/91224c2f99a2af36a9fa3601a0098090..pdf> Acesso em: 24 maio 2012.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2008 - segundo levantamento. Brasília, agosto, 2008. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/7d8871309d6409c9ba38739d4f59d434..pdf>. Acesso em: 24 maio 2012.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2009 - segundo levantamento. Brasília, setembro, 2009a. Disponível

em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/9579d4162da214d30b9e86a7881b447c..pdf>. Acesso em: 24 maio 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2009/2010 - segundo levantamento. Brasília, dezembro, 2009b. Disponível em http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento2009_dez2009.pdf. Acesso em: 25 maio 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2010/2011 - segundo levantamento. Brasília, agosto, 2010. Disponível em <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/ecf76fd96889c63b1368be8085214377..pdf>. Acesso em: 24 maio 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar - Safra 2011/2012 - segundo levantamento. Brasília, agosto, 2010. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_08_30_13_41_19_boletim_cana_portugues_-_agosto_2011_2o_lev..pdf. Acesso em: 25 maio 2012.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979, 212p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 33).

FAOSTATS - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 25 maio 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): Banco de Dados Agregados. Sistema IBGE De Recuperação Automática (SIDRA). Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 25 maio 2012.

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, A. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v. 43, n. 11, novembro, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2008001100002&script=sci_arttext Acesso em: março 2012.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Identificação de áreas e fases de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, 2012a (Manuscript submitted for publication).

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; ROLIM, G.; LAMPARELLI, R. A. C.; MARTINS, M. Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar

simulados pelo modelo ECMWF para o Estado de São Paulo. **Braslian Journal of Irrigation and Drainage (IRRIGA)**, v.3, n.17, p.397-407, 2012b.

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

RODRIGUES, J.D. Fisiologia da cana-de-açúcar. Unesp Botucatu, Instituto de Biociências, Botucatu, 1995.

TRIANA, C. A. R. Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches, Energy Policy, Volume 39, Issue 8, August 2011, Pages 4605-4613, ISSN 0301-4215, 10.1016/j.enpol.2011.05.001.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511003545>)

UDOP União dos Produtores de Bioenergia. Disponível em http://www.udop.com.br/download/estatistica/area_cultivada/01mar12_evolucao_produtividade.pdf. Acesso em 24 maio 2012.

XAVIER A.C.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERKA L.M.S.; MOREIRA M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **Inteational Journal of Remote Sensing**. v. 27, n.3-4, p.755-768, 2006.

4.4. Artigo 4: Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Resumo - O conhecimento da produtividade das culturas agrícolas é de extrema importância tanto para o setor público como privado. A cana-de-açúcar é uma das principais culturas no Brasil, sendo um dos maiores produtores de açúcar e etanol do mundo. A variabilidade climática afeta diretamente a produtividade agrícola. A estimativa desta produtividade é possível a partir da aplicação de modelos agrometeorológicos. Além disso, dados espectrais oriundos de sensoriamento remoto, permitem o monitoramento da dinâmica do cultivo agrícola. Neste trabalho foram utilizados dados meteorológicos do modelo global ECMWF e dados espectrais do sensor MODIS. Estes dados foram aplicados na metodologia da Zona Agroecológica (ZAE) para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010. A estimativa da produtividade potencial e o déficit hídrico foram adaptados ao modelo. Os resultados foram comparados com dados oficiais divulgados pelo órgão IBGE na escala de município e apresentaram relativa eficácia, sendo grande parte com uma superestimativa entre 0 e 25 mil quilogramas por hectare. Foi possível também a geração de mapas de déficit hídrico no Estado de São Paulo para cada período, destacando assim áreas com queda na produtividade.

Palavras-chave: deficit hídrico, modelagem, geotecnologias

Estimate of sugarcane yield in Sao Paulo State

Abstract - Knowledge of yield is extremely important for public and private sector. The sugarcane is an important crop in Brazil and one of the world largest producer of sugar and ethanol. Climate variability affects directly agricultural yield. The estimate of this yield is possible through agrometeorological models. In addition, spectral data from remote sensing allow monitoring of the dynamics of the crop. In this study we used meteorological data from the ECMWF global model and spectral data from MODIS. These data were applied in the Agroecological Zone (ZAE) methodology to estimate the yield of sugarcane in 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 and 2009/2010 periods. The estimation of potential yield and water deficit were adapted to the model. The results were compared with official data released by IBGE in municipality scale and presented relative efficacy, being largely an overestimate

between 0 and 25,000 kg per hectare. It was possible to create maps of water deficit in the Sao Paulo state for each period, highlighting sugarcane reduce yield.

Key-words: water deficit, modeling, geotecnology

4.4.1. Introdução

A produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo equivale a aproximadamente 60% do total no Brasil (IBGE, 2012), sendo o país responsável por 43% da produção no mundo (FAOSTATS, 2012). Esta é voltada para produção de açúcar e etanol, sendo este último uma alternativa competitiva aos combustíveis fósseis, onde o Brasil possui papel de destaque principalmente pela sua independência tecnológica (Goldemberg, 2007).

A variabilidade desta produção é dependente das condições climáticas, a qual afeta principalmente a produtividade (Pereira et al., 2002). Este por sua vez determina a quantidade de matéria prima disponível para a indústria, podendo prejudicar o rendimento da produção. Assim, o conhecimento da produtividade é de extrema importância, pois permite o planejamento das atividades do agronegócio, assim como políticas públicas no setor sucroalcooleiro.

A estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil, na escala municipal, é obtida e divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta é oriunda de metodologia subjetiva, onde a coleta das informações referente à produção agrícola municipal é realizada mediante aplicação de um questionário para cada município do país, o qual é preenchido pelo agente de coleta do IBGE. Este é aplicado a partir de contatos com técnicos do setor agrícola, grandes produtores e do próprio conhecimento que o agente possui sobre as atividades agrícolas dos municípios ou região onde atua (IBGE, 2002).

Com intuito de melhorar a estimativa do rendimento da cana-de-açúcar, diversos autores propõem metodologias objetivas, baseadas em dados agrometeorológicos e espectrais (Doorenbus e Kassan, 1979; Rudorff et al., 1990; Simões et al., 2009; Oliveira et al., 2012). Segundo Hoogenboom (2000), os modelos, em geral, são uma representação matemática de um sistema do mundo real onde é impossível incluir todas as interações entre o ambiente e o sistema modelado num modelo de computador, sendo assim uma simplificação. Porém, esta modelagem permite o conhecimento da variabilidade dos fatores que influem na produtividade, permitindo assim, análises e previsões baseando-se na realidade.

Dentre os vários modelos de produtividade, o Método da Zona Agroecológica (ZAE) apresentado em Doorenbus e Kassan (1979) e Fischer et al., (2002), exige poucos dados de entrada e apresenta resultados próximos da realidade. Vários autores já constatarem a eficiência do modelo em várias aplicações (Deng et al., 2006 ;Santos et al., 2011; Oliveira et al., 2012).

O uso de geotecnologias e sensoriamento remoto aliado a dados agrometeorológicos e modelagem, permitem visualizar a dinâmica do cultivo agrícola, além de espacializar estimativas de resultados. O sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo do satélite Terra (EOS AM) e Aqua (EOS PM) é adequado ao monitoramento de coberturas vegetais (XAVIER et al., 2006; AGUIAR, 2008). Já os dados agrometeorológicos, geralmente oriundos de estações de superfície, são de difícil acesso e podem apresentar erros. Assim, uma alternativa são dados provenientes de modelos globais como o ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast).

O objetivo do trabalho foi estimar a produtividade da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo a partir da aplicação do modelo de Doorenbus e Kassan (1979) considerando dados radiativos, térmicos e hídricos obtidos do modelo ECMWF dentro do período entre o crescimento e colheita da cana-de-açúcar identificada pelo sensor MODIS.

4.4.2. Material e Métodos

O trabalho foi feito considerando toda área do Estado de São Paulo nos períodos entre os anos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010, sendo o início no mês de maio do primeiro ano e o fim no mês de novembro do ano seguinte.

Para este trabalho, de modo a obter os intervalos entre datas de crescimento e colheita da cana-de-açúcar, foram utilizadas, conforme descrito por MORAES et al., (2012a), máscaras de mapeamento da variação temporal. Estas foram obtidas para cada pixel a partir de dados de NDVI do sensor MODIS, produto MOD13Q1, no formato TIFF, resolução espacial de 0,002299° (grau) e temporal de 16 dias. Assim, temos dentro desta resolução espacial e temporal, diferentes intervalos entre crescimento e colheita, para cada pixel, considerando o espaço dentro de cada período.

Também foram utilizados dados agrometeorológicos de radiação global ($\text{kJ dia}^{-1} \text{ m}^{-2}$), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluvial (mm) e evapotranspiração de referência

(mm) provenientes do modelo global ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). Este, possuindo resolução espacial de 0,25° (grau) e temporal de 10 dias foi transformado para a mesma resolução espacial e temporal do MODIS, através da re-amostragem espacial dos dados e transformação da escala temporal decendial para diária e recalculada para cada 16 dias. Comparando dados de temperatura máxima e mínima e precipitação, oriundas de estações de superfície com dados do modelo ECMWF para o estado de São Paulo, MORAES et al. (2012b) encontrou resultados satisfatórios maior parte dos resultados com $R^2 > 0,60$; $d > 0,7$; $RMSE < 5^\circ C$ e $< 50mm$; $Es < 5^\circ C$ e $< 24mm$, podendo assim ser utilizado de forma direta.

A estimativa da produtividade da cana-de-açúcar foi feita a partir do modelo de Doorenbos e Kassan (1979), apresentado na equação 1.

$$Y_a = Y_m \left\{ 1 - \left[k_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

Em que, Y_a é a produtividade estimada ($kg\ ha^{-1}$); Y_m a produtividade potencial ($kg\ ha^{-1}$); k_y o fator resposta de rendimento; ET_r a evapotranspiração real (mm); ET_c a evapotranspiração da cultura (mm).

A aplicação deste modelo nos dados disponíveis e na escala de pixel é apresentada em duas partes, onde na Figura 4.4.1 é apresentado os procedimentos para a estimativa da produtividade potencial (Y_m) e na Figura 2 é mostrado o procedimento de estimativa do déficit hídrico (dado pela razão de ET_r / ET_c) e da produtividade estimada (Y_a).

Conforme Figura 4.4.1 e equação 2, o valor da Y_m é dado pelo Método da Zona Agroecológica (ZAE), desenvolvido por Doorenbos e Kassan (1979). Este método estima o potencial de biomassa em função da temperatura do ar, irradiância solar e da duração do ciclo da cultura, além de fatores genéticos. Esta produtividade representa a produtividade atingível onde não há limitações de clima, água e nutrientes e sem o ataque de pragas e doenças.

$$Y_m = C_{iaf} \cdot C_r \cdot C_{col} \cdot C_{um} \cdot ND \cdot \{ [F \cdot (a + (b \cdot PPB_p)) \cdot PB_n] + [(1 - F) \cdot (c + (d \cdot PPB_p)) \cdot PB_c] \} \quad (2)$$

Em que, Y_m é a produtividade potencial; C_{iaf} é o coeficiente de área foliar (conforme Barbieri e Tuon, 1992); C_r o coeficiente de correção para a respiração; C_{col} o coeficiente de colheita com valor igual a 0,8; C_{um} o coeficiente de umidade; ND é o comprimento do período

entre o crescimento e colheita da cana-de-açúcar; F é a fração nebulosidade; PPB_p é a taxa de produção em função da temperatura; PB_n a produção bruta para dias nublados; PB_c a produção bruta para dias claros; a , b , c , d são os coeficientes dados para PPB_p maior que $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (característica da cana-de-açúcar conforme Doorenbos e Kassan, 1979), iguais a 0,8, 0,01, 0,5 e 0,025 respectivamente.

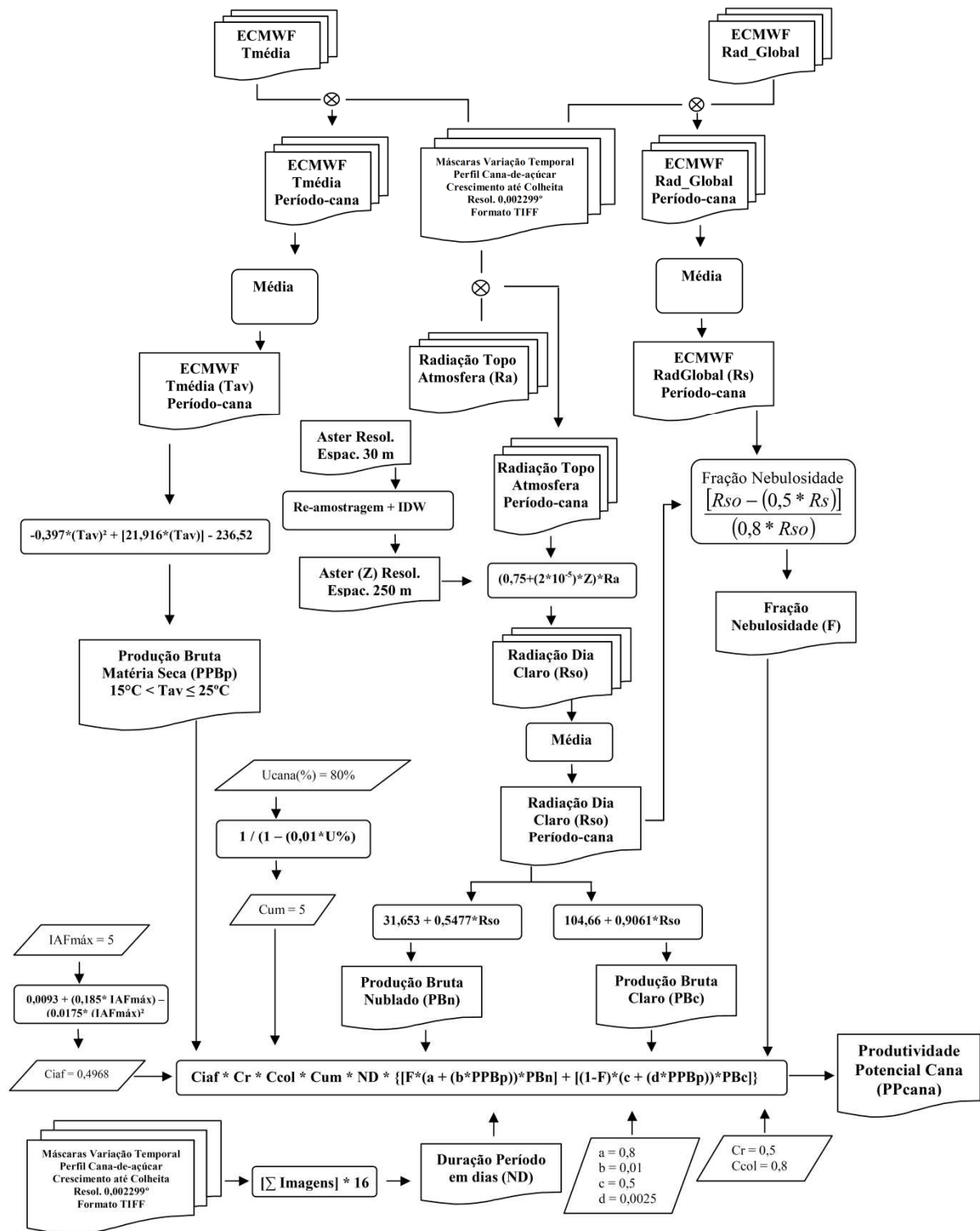


Figura 4.4.1. Fluxograma das etapas para a estimativa produtividade potencial a partir do modelo de Doorenbus e Kassan (1979).

De acordo com a Figura 4.4.1, o fluxograma inicia-se com a entrada de dados de temperatura média do ar e radiação global obtido a partir de dados do modelo ECMWF e radiação no topo da atmosfera. Nestes três dados de entrada foi aplicada a máscara temporal de crescimento e colheita citada anteriormente, sendo valores válidos apenas os que se encontrassem dentro de cada período por pixel. A radiação no topo da atmosfera foi calculada conforme Allen et al. (1998) considerando a latitude e longitude de cada pixel. A partir desta, foi utilizada uma imagem de altitude do ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) com resolução espacial de 30 metros, onde esta foi alterada para 250 metros e aplicada, conforme Allen et al. (1998), na equação de estimativa da radiação solar para dias claros. Os dados radiativos foram convertidos da unidade $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$.

As séries temporais de temperatura média do ar, radiação global e radiação para dias claros, foram organizadas de modo a obter a média para cada pixel da série temporal e assim ter apenas uma imagem para cada variável. A partir das imagens de radiação global e radiação para dia claro, foi calculada a fração nebulosidade (F) conforme Doorenbos e Kassan (1979). Conforme Micale et al., (2004), a nebulosidade é considerada na radiação global fornecida pelo modelo global ECMWF, onde, dependendo da disponibilidade, é levado em conta a duração do brilho solar (n) presente na equação de Angstron. Na ausência deste dado, o modelo considera a equação de Supit que leva em consideração a temperatura máxima e mínima do ar e o índice cobertura de nuvens (CC). Caso não tenha o índice CC, é estimada a radiação global pela equação de Hargreaves.

A produção bruta de matéria seca (PPB_p), foi estimada em função da temperatura média do ar, a partir da equação apresentada no fluxograma da Figura 4.4.1. Esta, utilizada por Oliveira et al. (2012) para a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar com o método ZAE no Estado de Minas Gerais, considera o intervalo de temperatura média do ar no Estado de São Paulo entre 15°C e 25°C . Esta equação é baseada na regressão polinomial conforme valores apresentados por Fischer et al. (2002) e Doorenbos e Kassan (1979).

Os valores de PB_n e PB_c apresentados na Figura 4.4.1, são obtidos a partir de equações propostas por Leal (2000) onde a partir de uma regressão linear de todos os dados tabelados da relação entre a radiação solar para dias claros e a produção bruta para dias claros e nublados conforme Doorenbos e Kassan (1979).

Para o valor de C_r foi adotado igual 0,5 onde, segundo Doorenbos e Kassan (1979), é o valor dado para locais onde a temperatura média seja maior que 20°C. No estudo, foi confirmada para 97% dos pixels considerando todo o Estado de São Paulo esta temperatura, julgando que não seria necessária a seleção de pixels com temperatura menor. A duração do período em dias (ND) foi calculada de modo a multiplicar o comprimento de cada período em cada pixel por 16, sendo esta distância, em dias, de cada imagem do sensor MODIS utilizada nas máscaras de mapeamento da variação temporal.

Após a estimativa da produtividade potencial, foi criada uma metodologia para a penalização desta, baseada no déficit hídrico entre os dados de precipitação (RRR) e evapotranspiração (ET_0) do modelo global ECMWF apresentada na Figura 4.4.2.

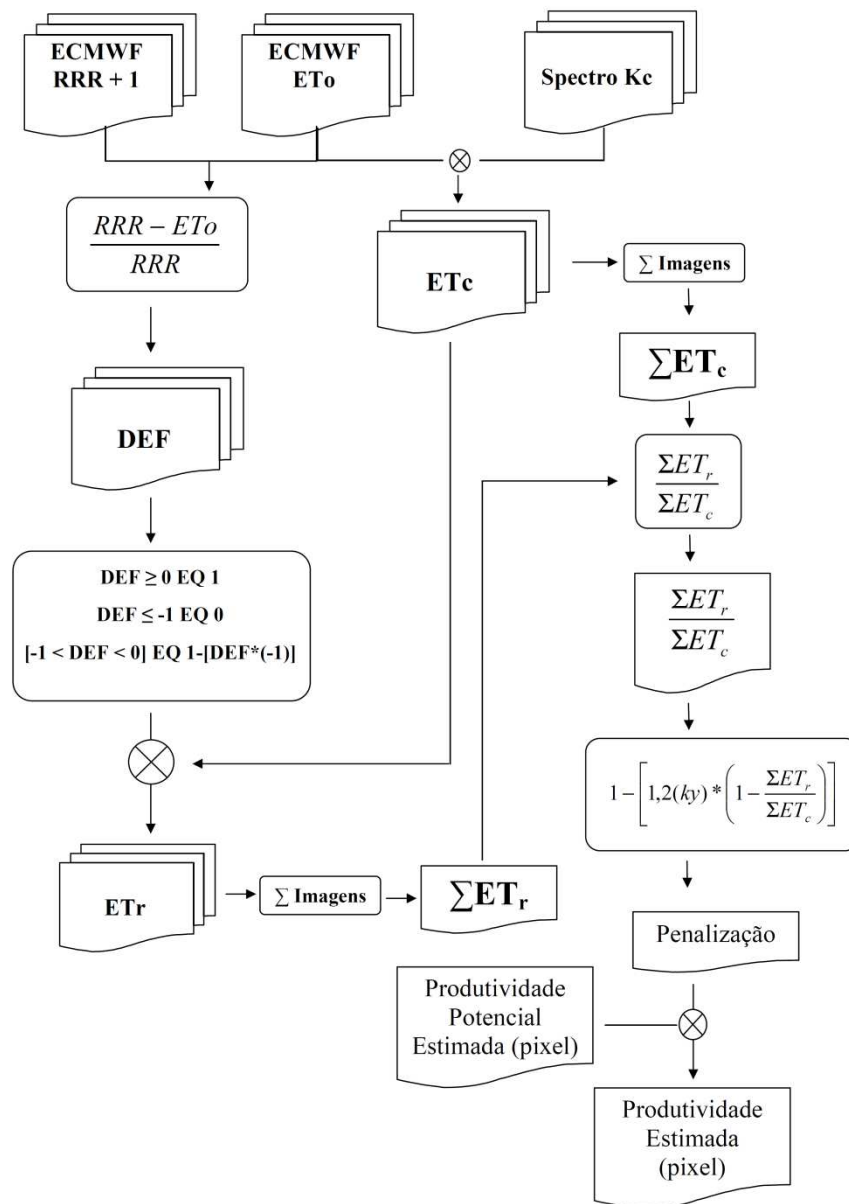


Figura 4.4.2. Fluxograma das etapas para a estimativa da razão da ETr em relação a ETc e da penalização da produtividade potencial para obtenção da produtividade estimada.

Os dados para a estimativa da penalização iniciam-se a partir de três dados de entrada, sendo a precipitação, evapotranspiração e do espectro do coeficiente da cultura (k_c). Estes valores, da mesma forma que a temperatura média do ar e a radiação global, foram

separadas de modo a apresentarem valores apenas dentro do período de cultivo da cana-de-açúcar, conforme descrito anteriormente.

O espectro k_c , foi construído a partir da média ponderada dos valores apresentados para cana-de-açúcar em Doorembus e Kassan (1979), sendo que utilizando as datas de classificação obtidas por Moraes et al. (2012a), foi considerado o valor de k_c igual a 1,12 da data de crescimento até a maturação e de 0,84 da maturação até a colheita. Este espectro foi aplicado nas imagens de ET_0 , obtendo assim a variabilidade temporal da evapotranspiração da cultura (ET_c) para cada pixel.

Para a geração da evapotranspiração real (ET_r), foi criado um fator percentual de déficit hídrico. Este déficit foi obtido a partir da razão da diferença entre RRR e ET_0 sobre RRR, gerando um percentual de água utilizada onde caso RRR seja maior que ET_0 , teremos um número positivo maior que zero e assim, ausência de déficit, atribuindo o valor igual a um. Caso o déficit seja menor igual a menos 1 (-1), é atribuído o valor zero e se estiver entre -1 e 0, será igual ao um menos o módulo do déficit ($1 - |DEF|$), obtendo assim, de modo decimal, o total de RRR em relação a ET_0 . Assim, a penalização seria a percentagem da disponibilidade hídrica para cada píxel. Este conjunto de imagens obtidos, foi aplicado no conjunto de imagens da ET_c , obtendo assim a ET_r .

Após termos o conjunto de imagens da variabilidade de ET_c e ET_r no período considerado no estudo, foi calculado o somatório destes e feita a razão entre ET_r e ET_c , onde foi aplicado na equação 1. O valor do fator resposta de rendimento considerado foi igual a 1,2 conforme Doorembus e Kassan (1979) para todo o ciclo da cana-de-açúcar.

Assim, de posse de todos os dados em formato de imagem, foi executada a equação 01, considerando todos os fatores, obtendo assim a produtividade estimada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Para a geração dos resultados, foi calculada a média da produtividade estimada em cada pixel dentro de cada município e comparada com dados do IBGE. Além disso, para a geração dos mapas, foram considerados apenas os maiores municípios em área plantada, englobando 99% de toda área plantada no Estado de São Paulo.

De modo a quantificar as diferenças entre o estimado e os dados do IBGE, foram obtidos o Erro Sistemático (Es) em kg/ha, a raiz do erro médio quadrático (RMSE) em kg/ha e o Erro Absoluto Percentual Médio (EAPM) em percentagem (%), conforme equações 1, 2 e 3 respectivamente.

$$Es = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{metod} - Y_{est})^2}{N}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (pi - oi)^2}{n}} \quad (2)$$

$$EAPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{[pi - oi]}{oi} * 100 \right] \quad (3)$$

sendo, pi o valor estimado pela metodologia; oi o valor observado; n o número de observações; $\bar{o}$ a média aritmética dos valores do IBGE; Y_{metod} os valores estimados pela metodologia e Y_{est} os valores gerados por regressão linear simples entre os dados estimados e do IBGE.

4.4.3. Resultados e Discussão

A disponibilidade hídrica para cada pixel (penalização) é apresentada na Figura 4.4.3, para cada período do estudo. A legenda dos mapas foi dividida a cada 0,25 sendo para o intervalo entre 0,76 e 1,0; 0,51 e 0,75; 0,26 e 0,50; 0,1 e 0,25 um déficit hídrico de no máximo 24%, 49%, 74% e 90% respectivamente durante o período entre as fases de crescimento e colheita da cana-de-açúcar; sendo esta percentagem a queda na produtividade potencial estimada. Verifica-se que em grande parte dos resultados, esta penalização é maior que 0,51 sendo apenas pequenas áreas com valores menores, com exceção do período de 2008/2009 onde na parte central e sudoeste do estado há um grande déficit hídrico com poucas áreas no intervalo entre 0,76 e 1.

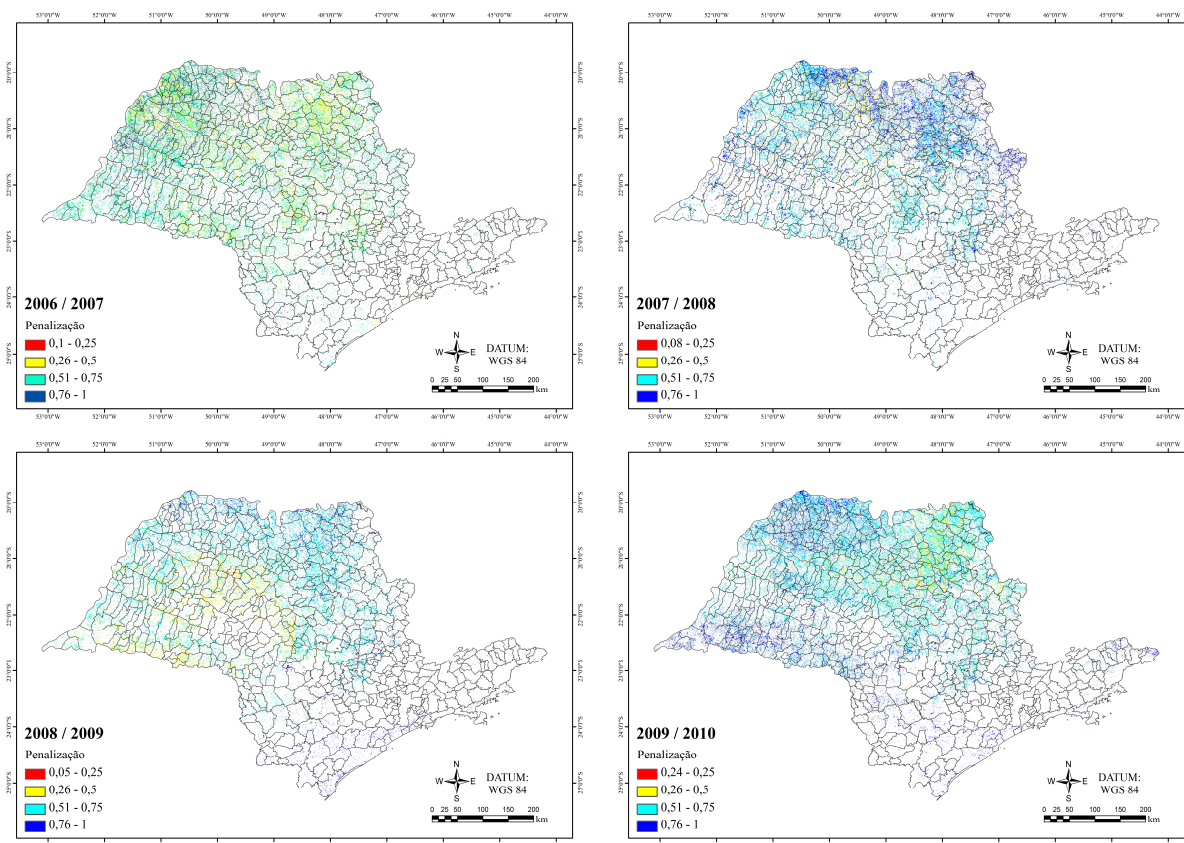


Figura 4.4.3. Imagem Penalização referente à disponibilidade hídrica aplicada à produtividade potencial estimada para os períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

Na Figura 4.4.4, após a execução da equação 01, para todos os pixels utilizados no estudo para cada período, temos o rendimento médio para cada município no estado de São Paulo. Os municípios apresentados representam, como citado anteriormente, 99% da área plantada. Para o período de 2006/2007, verifica-se uma produtividade maior que 83 mil quilogramas por hectare, sendo o rendimento maior a oeste.

No período 2007/2008 há um aumento no rendimento estimado à nordeste e extremo oeste, com municípios com médias maiores que 120 mil kg/ha. Já em 2008/2009, ocorre uma queda drástica, principalmente na área central do estado, da produtividade média, com valores menores que 80 mil kg/ha. De modo a consultar outra fonte de dados, conforme UDOP (2012), a produtividade para a região centro-sul do Brasil nos anos de estudos, apresentaram valores de 75,4 mil kg/ha para 2006/2007, 84,9 mil kg/ha para 2007/2008 e 81,2 para

2009/2010. Para o período de 2008/2009 foi de 69,1 mil kg/ha mostrando uma queda relativamente grande. No período seguinte, 2009/2010, verifica-se uma recuperação e melhora na produtividade média, principalmente a oeste do estado com valores maiores que 140 mil kg/ha.

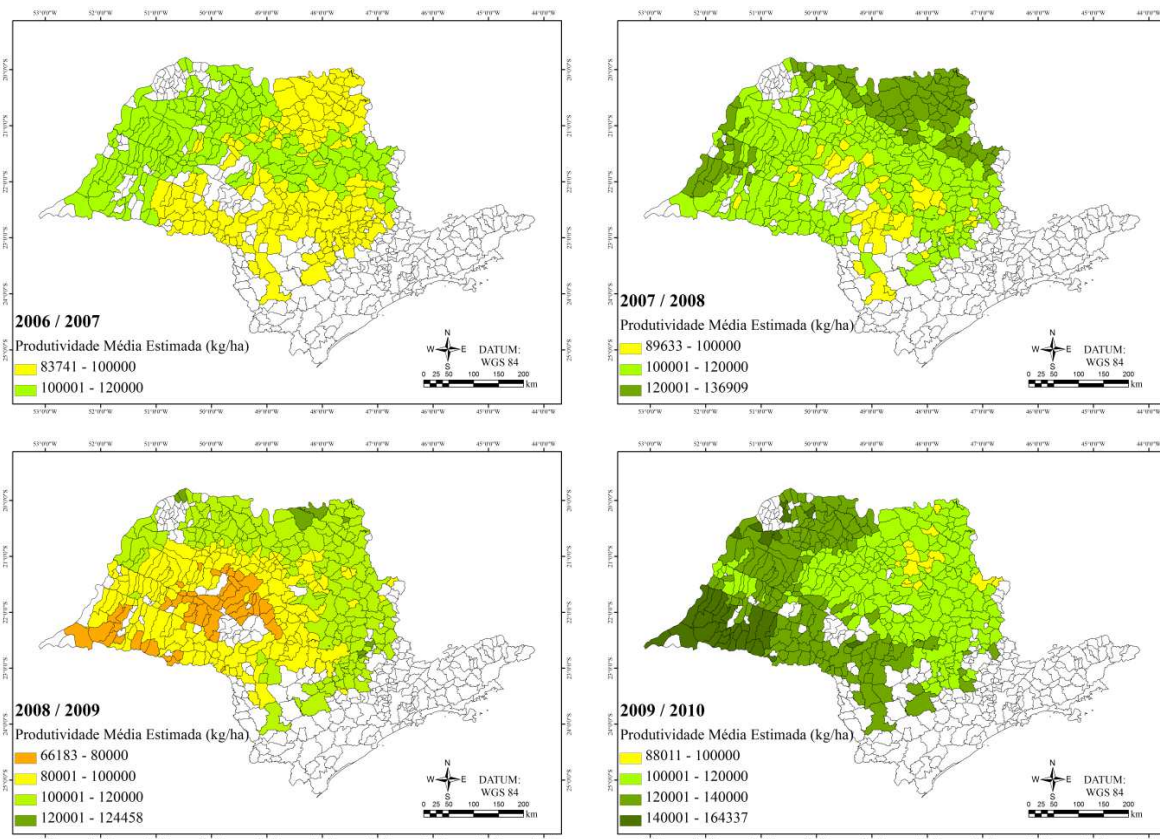


Figura 4.4.4. Produtividade potencial média para os municípios cuja área engloba 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

De modo a comparar a metodologia de estimativa da produtividade média da cana-de-açúcar, foi executada a diferença entre os dados estimados e os dados do IBGE em cada município e apresentada na forma de mapa, na unidade de kg/ha, na Figura 4.4.5. A legenda é dividida a cada 25 mil kg/ha de modo a equalizar os resultados para todos os períodos. Para a execução desta diferença, foram utilizados apenas municípios onde, segundo dados do IBGE para cada período em questão, possuíse rendimento com valores maiores que zero.

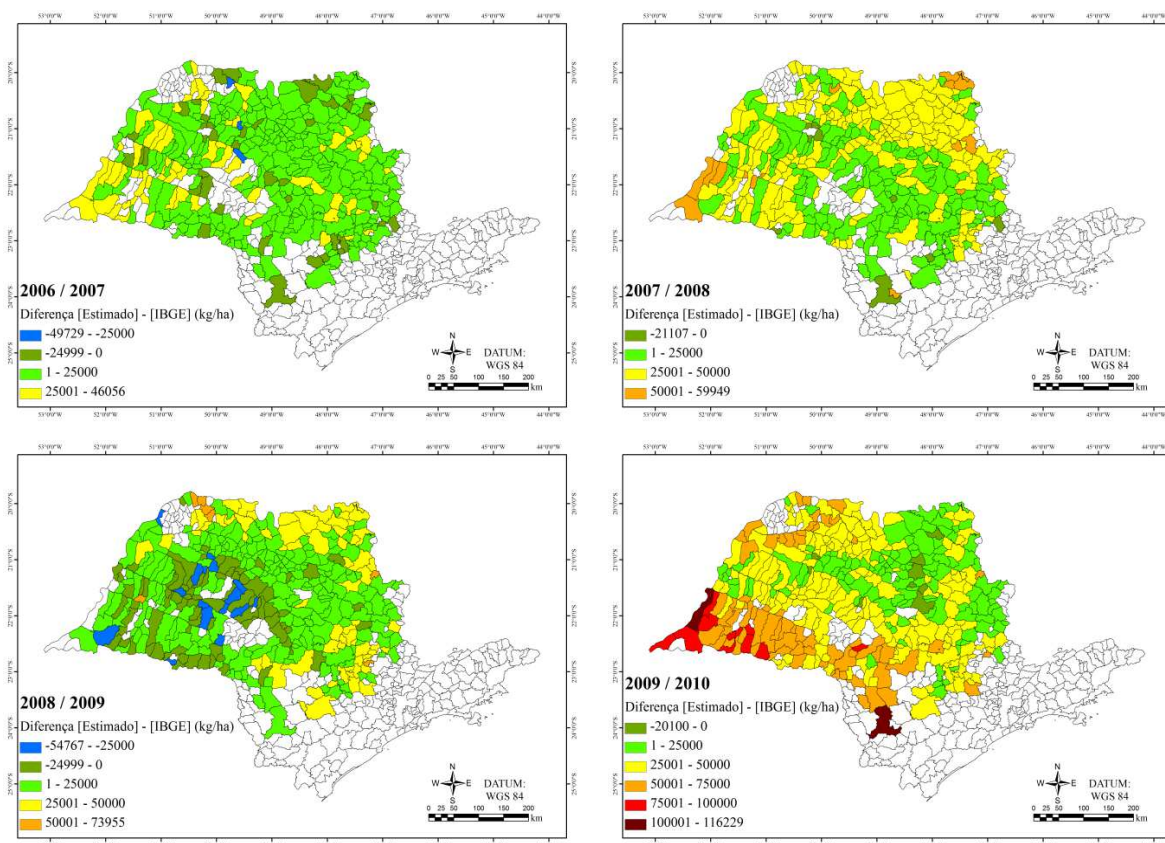


Figura 4.4.5. Diferença entre a produtividade potencial estimada e a produtividade dada pelo IBGE para os municípios com rendimento (segundo o IBGE) maiores que zero para a cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

Verifica-se que não houve grandes diferenças para a maioria dos municípios, principalmente nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no estado (nordeste / centro-norte). No primeiro período do estudo, em grande parte temos uma superestimativa do rendimento em média de 25 mil kg/ha. Já no segundo período (2007/2008), há um aumento de 25 mil kg/ha nesta superestimativa, ficando entre 25 e 50 mil kg/ha em grande parte dos municípios.

Conforme esperado, no período 2008/2009 verifica-se uma subestimativa na parte centro-oeste do estado de até 50 mil kg/ha, sendo a maioria destes com no máximo 25 mil kg/ha e alguns em torno com valores maiores. Possivelmente isso se deve aos dados do IBGE serem subjetivos e assim, municípios com usinas instaladas podem possuir áreas nos

municípios vizinhos sendo detectado pela metodologia apresentada, diferentemente do IBGE. Além disso, por ser subjetivo, os dados do IBGE não apresentam grandes variações na sua série histórica, principalmente nos períodos deste estudo, com pequenos aumentos no rendimento para cada município no decorrer dos períodos. No restante do estado, as diferenças ficaram entre 0 e 25 mil kg/ha com alguns municípios entre 25 e 50 mil kg/ha.

Em 2009/2010 há uma grande superestimativa do rendimento a oeste, centro-oeste e centro-sul do estado, com alguns municípios com valores maiores que 75 mil kg/ha. Estes municípios, conforme dito anteriormente podem estar sofrendo influência de municípios vizinhos produtores de cana-de-açúcar. A oeste do estado há municípios que aparecem no mapeamento em quase todos os períodos, sendo que em 2008/2009 foram excluídos. Isso se deve a metodologia de seleção dos municípios para o cálculo da diferença, conforme citado anteriormente; se foram excluídos neste período, mostra que o rendimento foi igual a zero e assim, segundo o IBGE, este apresenta uma baixa produtividade e possivelmente municípios próximos podem ter sofrido influência.

Na Tabela 4.4.1, é apresentado os valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios com rendimento (segundo o IBGE) maiores que zero para a cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010. Verificou-se que o houve um Erro Sistemático entre 15.569 e 17.234 kg/ha e uma magnitude média dos erros entre 20.784 até 46.121 kg/ha. O EAPM apresentou o menor valor no período de 2006/2007, com 30,2% e o maior no período de 2009/2010 com 57,9%.

Tabela 4.4.1. Valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios com rendimento (segundo o IBGE) maiores que zero para a cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

Período	n° municípios	Es (kg/ha)	RMSE (kg/ha)	EAPM (%)
2006/2007	483	16.331	24.816	30,2
2007/2008	506	15.569	20.784	45,5
2008/2009	499	17.234	30.732	35,7
2009/2010	521	15.916	46.121	57,9

Na Tabela 4.4.2, é apresentado os valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios que representam 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010. Verificou-se que houve uma melhora nos resultados ao considerar apenas os municípios representando 99% da área, onde o número de municípios foi menor. O Erro Sistemático ficou entre 11.007 e 12.828 kg/ha; a magnitude média dos erros apresentou valores entre 19.203 e 39.417. Os valores do EAPM ficaram entre 20,7% e 44,0%

Tabela 4.4.2. Valores do Es, RMSE e EAPM, considerando os municípios que representam 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de SP nos períodos de 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010.

Período	n° municípios	Es (kg/ha)	RMSE (kg/ha)	EAPM (%)
2006/2007	364	12.568	19.203	20,7
2007/2008	380	11.007	29.767	33,9
2008/2009	389	12.828	22.111	22,2
2009/2010	396	11.456	39.417	44,0

Assim, apesar da metodologia apresentar diferenças relativamente grandes para alguns municípios, em grande parte do estado apresentou-se valores aceitáveis em relação ao dado oficial (IBGE). Além disso, a obtenção de resultados pela metodologia desenvolvida pode ser feita num prazo de até 10 meses antes da publicação dos dados oficiais, onde, segundo IBGE (2002), está previsto para todo mês de novembro. Destaca-se também que diferentemente do IBGE, esta é uma metodologia objetiva, baseada na contabilização da energia radiativa, térmica e déficit hídrico para cada pixel identificado com comportamento de cana-de-açúcar.

4.4.4. Conclusões

De acordo com os mapas e índices apresentados, o modelo de Doorenbus e Kassan (1979) adaptado a dados meteorológicos do modelo global ECMWF em conjunto com a identificação de pixels do sensor MODIS, apresentou estimativas promissoras para a produtividade comparadas aos dados do IBGE, principalmente considerando os municípios

que representam 99% da área plantada de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Além disso, a metodologia de penalização da produtividade máxima estimada pelo método ZAE, apresentou relativa eficácia quanto ao posicionamento espacial da ocorrência de déficits hídrico no Estado de São Paulo. Recomenda-se que a metodologia seja aprimorada no sentido de adicionar fatores como tipos de solo, além de fazer estudos regionalizados para a comparação com dados observados de produtividade.

4.4.5. Referências

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drain, Paper n° 56**, FAO, Rome, Italy, 300 pp, 1998.

BARBIERI, V.; TUON, R.L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: ESALQ/Departamento de Física e Meteorologia. 1992. 17p.

DENG, X.; HUANG, J.; ROZELLE, S.; UCHIDA, E. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China. **Land Use Policy**, v. 23, n. 4, pp. 372–384, 2006.

Doorenbos, J.; Kassan, A. H. **Yield response to water** – Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 172p, 1979.

FAOSTATS. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Statistics Division of the FAO*. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 25 maio 2012.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century**: Methodology and results. Laxenburg: IIASA, 155p, 2002.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agric. For. Meteorol.** V. 103, pp. 137–157, 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisas Agropecuárias. Série Relatórios Metodológicos. Volume 6, 2 edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Banco de Dados Agregados. *Sistema IBGE De Recuperação Automática (SIDRA)*. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 25 maio 2012.

LEAL, B. G. **Sistema computacional para a avaliação e estimativa das produtividades potencial e real de culturas agrícolas**. Viçosa: UFV, 2000. 97p. Tese Doutorado

MICALE, F.; G. GENOVESE. **Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System**. Meteorological data collection, processing and analysis. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, vol. 1, 102p, 2004.

OLIVEIRA, A. R.; SANTOS, R. S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M. H. P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (AGRIAMBI)**, v. 16, n.5, p.549—557, 2012.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Identificação de áreas e fases de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, 2012a (in press).

MORAES, R.A.; ROCHA, J.V.; ROLIM, G. S.; LAMPARELLI, R.A.C.; MARTINS, M. Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o Estado de São Paulo. **Brasilian Journal of Irrigation and Drainage (IRRIGA)**, v.3, n.17, 2012b (in press).

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

RUDORFF, B.F.T. and BATISTA, G.T. Yield Estimation of Sugarcane Based on Agrometeorological-Spectral Models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192, 1990.

SIMÕES, M. dos S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Orbital spectral variables, growth analysis and sugarcane yield. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.4, p.451-461, 2005.

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. Avaliação da relação seca/produtividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 26, n. 2, 2011.

UDOP. União dos Produtores de Bioenergia. *Estatísticas*. Disponível em http://www.udop.com.br/download/estatistica/area_cultivada/01mar12_evolucao_produtividade.pdf. Acesso em 24 maio 2012.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados deste trabalho foram apresentados no formato de 4 artigos e as principais conclusões, considerando todo o trabalho foram:

1. A utilização de imagens de NDVI oriundas do sensor Modis permite o mapeamento e monitoramento da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e considerando todos os municípios apresentou resultados satisfatórios, com boa precisão e exatidão;
2. A transformação dos perfis temporais de NDVI do sensor Modis em perfil de coeficiente angular e variância permitiram, a partir da metodologia proposta, a identificação de perfis característicos de cana-de-açúcar e o perfil temporal de coeficiente angular proposto permite a definição das datas das fases de cultivo presente nas alterações do índice de vegetação NDVI;
3. Os dados do modelo global ECMWF de precipitação e temperatura do ar máxima e mínima apresentaram resultados satisfatórios espacialmente quando comparados com dados observados no estado de São Paulo sendo viável a sua utilização;
4. A utilização de mascarás criadas a partir das datas de cultivo identificadas utilizando o perfil temporal de coeficiente angular de imagens NDVI do sensor Modis juntamente com dados meteorológicos do ECMWF permitiu a visão espacial, na escala estadual, da variabilidade da precipitação pluvial, evapotranspiração de referência e radiação global e permitiu assim fazer análises condizentes com a realidade;
5. A partir da duração do ciclo da cana-de-açúcar identificados no trabalho, foi possível perceber o impacto de sua redução, juntamente com a precipitação, na safra posterior;
6. O conhecimento de graus-dia para cana-de-açúcar de forma espacializada oferece meios de visualização do consumo de energia térmica da cana em cada região do estado;
7. O modelo de Doorenbus e Kassan (1979) adaptado a dados meteorológicos do modelo global ECMWF em conjunto com a identificação de pixels de imagens NDVI do sensor MODIS, permitiu estimar a produtividade de forma promissora em relação ao dado oficial no Brasil (IBGE);

8. A metodologia de penalização da produtividade máxima estimada pelo método ZAE, apresentou relativa eficácia quanto ao posicionamento espacial da ocorrência de déficits hídrico no Estado de São Paulo.

A partir das conclusões deste trabalho, recomenda-se para estudos futuros o aprimoramento da metodologia de transformação de perfis temporais de NDVI do sensor Modis em perfis de coeficiente angular e variância, com a utilização de novos métodos de suavização do perfil de NDVI e largura da janela móvel. Além disso, a criação de um sistema onde automatize todas as fases desta transformação facilitaria a geração de mapas, máscaras e o aperfeiçoamento da técnica.

Recomenda-se que a metodologia da estimativa da produtividade seja aprimorada no sentido de adicionar fatores como tipos de solo, além de fazer estudos regionalizados para a comparação com dados observados. A criação de um sistema automatizado para a aplicação da técnica de estimativa da produtividade também é recomendado, facilitando a geração de estimativas e o aprimoramento da técnica.

Espera-se que no futuro, o aumento da resolução espacial dos sensores remotos juntamente com a alta resolução temporal e capacidade de processamento e armazenamento dos sistemas computacionais, permitam uma representatividade da realidade da superfície mais refinada, aumentando a pureza dos pixels e por conseguinte o comportamento espectral dos perfis temporais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHA M. G.; SAVAGE M. J. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 115, p. 150–160, 2006.

AGUIAR, D. A. de; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.** [online], v.29, n.3, p. 440-451, 2009.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens modis. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, p. 375-383, 2008.

ARAUJO, G. K. D.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, A. M. Mapping of summer crops in the State of Paraná, Brazil, through the 10-day spot vegetation NDVI composites. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n.4, p. 760-770, 2011.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. ; EVANGELISTA, S. R. ; PILAU, F. G. ; FARIAS, J. R. B. ; PINTO, H. S. ; ZULLO JUNIOR, J. Sistema de previsão de safra de soja no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Campinas-SP, v. 42, p. 615-625, 2007.

BÉGUÉ, A., TODOROFF, P., PATER, J. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: Improved crop diagnosis using satellite time series. **Precision Agriculture**, v. 9, p. 161–171. 2008.

BERNARDES, T.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R.; MOREIRA, M. A.; FRANÇA, D. A.; NOVAES, M. R. Imagens mono e multitemporais Modis para estimativa da área com soja no Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira (PAB)**, v.46, n.11, p.1530-1537, 2011.

BIGGS, T. W.; THENKABAIL, P. S.; GUMMA, M. K.; SCOTT, C. A.; PARTHASARADHI, G. R.; TURRAL, H. N. Irrigated area mapping in heterogeneous

landscapes with Modis time series, ground truth and census data, Krishna Basin, India. **International Journal of Remote Sensing**. v.27 n.19 p.4245 – 4266, 2006.

BLAIN, G.C.; ROLIM, G.de S.; CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O. Relação entre os dados meteorológicos ECMWF preparados pelo JRC-MARS-FOOD e dados de superfície para estimativa de produtividade de soja no estado de São Paulo, Brasil. p.61-68. In: 2º INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

CANASAT. Mapeamento da cana via imagens de satélite e observação da Terra. <<http://150.163.3.3/canasat/intro.php>>. (acesso em 12 maio 2010).

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. (acesso em 12 junho 2010).

CHEN, C. F.; CHEN, Q.; CHANG, L.; CHEN, C. Mapping Paddy Rice Using Multi-Temporal Modis Images. In: 29th ASIAN CONFERENCE OF REMOTE SENSING, 2008, Nov, 2008 Colombo, Sri Lanka. **Proceedings** of ACRS. Disponível em <<http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2008/Papers/TS%2017.2.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2011.

COLLARES, J.E.R.; LAURIA, C.A.; CARRILHO, M.M. Pesquisa de previsão e acompanhamento de safras baseada em painéis de amostras de áreas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v.1, p. 450-3, 1993.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira: *Cana-de-Açúcar - Safra 2012/2013 - segundo levantamento*. Brasília, agosto, 2012. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_05_09_11_59_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf. Acesso em: 26 setembro 2012a.

CONAB. Geotecnologia. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=533&t=1>> (acesso em 01 outubro 2012b)

D'ARCO, E.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, B. **Índice de vegetação para estimativa de área plantada com arroz irrigado**. p.123-131. Org: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos/SP: Parêntese, 423p, 2007.

DELGADO-ROJAS, J. S.; BARBIERI, V.. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DENG, X.; HUANG, J.; ROZELLE, S.; UCHIDA, E. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China. **Land Use Policy**, v. 23, n. 4, pp. 372–384, 2006.

DEPPE, F.; MARTINI, L.; LONHMANN, M.; ADAMI, M. Validation studies of ECMWF precipitation data with observed SIMEPAR ground data (meteorological stations). p.83-92. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979, 212p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 33).

DUFT, D. G.; JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Metodologia para geração de máscaras de culturas de verão para o ano-safra 2007/2008 no Estado do Paraná por meio de índices de vegetação do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba-PR. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 0140-0147. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0549.pdf> >. Acesso em: 30.maio.2012.

EL HAJJ M., BÉGUÉ A., GUILLAUME S., MARTINÉ J.F.. **Combining multi-source information for crop monitoring**. In : 11th International Conference on Information Fusion, 30 June - 3 July 2008, Cologne, Allemagne. s.l. : s.n., [7] p.. Conference on Information Fusion. 11, 2008-06-30/2008-07-03, Cologne, Allemagne. 2008.

ESQUERDO, J. C. D. M. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná.** Tese Doutorado. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 186p, 2007.

ESQUERDO, J.C.D.M. ; ZULLO JUNIOR, J. ; ANTUNES, J.F.G. . Use of NDVI/AVHRR time series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, n.13, p. 3711 – 3727, 2011.

FAOSTATS. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Statistics Division of the FAO*. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 29 setembro 2012.

FERNANDES, E. **Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de imagens SPOT *Vegetation* e dados meteorológicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 115p, 2009.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of SPOT vegetation images. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 139-146, 2011.

FIGUEIREDO, D.C. Projeto GeoSafras - aprimoramento metodológico das estimativas de safras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.191-5.

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results.** Laxenburg: IIASA, 155p, 2002.

GATES, D. M.; KEEGAN, J. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. **Spectral Properties of Plants.** **Applied Optics**, v.4 n.1, p.11-20, 1965.

GAUSMANN, H. W.; ALLEN, W. A.; CARDENAS, R. Reflectance of Cotton Leaves and their Structure. **Remote Sensing of Environment**, v.1, p. 110-122, 1969.

GODOY, P. G. **Modelagem de Processos de Acumulação de Biomassa e de Açúcar da Cana-de-açúcar via Sistemas Nebulosos**. Tese Doutorado. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 254p, 2007.

GUYOT G. **Signatures spectrales des surfaces naturelles**. Collection “Télédétection stellitaire”. Caen: Édition Paradigme, 1989, 178p apud ESQUERDO, J. C. D. M. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná**. Tese Doutorado. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 186p, 2007.

GREENLAND, D. Climate variability and sugarcane yield in Louisiana. **J. of Applied Meteor.**, 44, 1655-1666. 2005.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

HAMADA, E.; RAQUEL GHINI¹; FERNANDES, J. F.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ROSSI, P.. Spatial and temporal variability of leaf wetness duration in the state of São Paulo, Brazil. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, v.65, special issue, p.26-31, December, 2008.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agric. For. Meteorol.** V. 103, pp. 137–157, 2000.

HUETE, A.; DIDAN L.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of the Environment**. v.83, n.1-2, p.195-213, nov, 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisas Agropecuárias. Série Relatórios Metodológicos. Volume 6, 2 edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Banco de Dados Agregados. Sistema IBGE De Recuperação Automática – SIDRA. <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> (acesso em 30 junho 2009).

JENSEN, J.R. 1949. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ed por: EPHIPHANIO, J.C.; FORMAGGIO, A.R.; SANTOS, A.R.; RUDORFF, B.F.T.; ALMEIDA, C.M.; GALVÃO, L.S. São José dos Campos/SP: Parêntese, 598p, 2009.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT - a program for analysing time-series of satellite sensor data. **Computers and Geosciences**, v.30, p.833-845, 2004.

JRC - **Joint Research Centre**. Data Distribution. Disponível em: <<http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/About-us/FOODSEC/Data-Distribution>>. (acesso 15 Julho 2010).

JUSTICE, C., VERMOTE, E., TOWNSHEND, J. R. G., DEFRIES, R., ROY, D. P., HALL, D. K., SALOMONSON, V. V., PRIVETTE, J., RIGGS, G., STRAHLER, A., LUCHT, W., MYNENI, R., KNJAZIHHIN, Y., RUNNING, S., NEMANI, R., WAN, Z., HUETE, A., VAN LEEUWEN, W., WOLFE, R.. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, jul. 1998 apud RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Coord.). **Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 425p, 2007.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LATORRE, M.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ANDERSON, L.O. **Produtos para ecossistemas terrestres – MODLAND**. p.23-35. Org: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos/SP: Parêntese, 423p, 2007.

LIRA, V.M.; SILVA, B.B.; DANTAS NETO, J. ET AL.. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 1, p. 113-120, 2009.

LONG, M.E.F.; HURTADO, R.H.; MURPHY, G.M. Validación de las temperaturas máximas y mínimas diarias de la región pampeana estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. p.37-44. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

MARIN, F. R. ; SUGUITANI, C. ; PALLONE FILHO, W. J. ; NASSIF, D. S. P. ; POLZER, D. L. ; VIANNA, M. S. . Avaliação do modelo canegro/dssat para quatro cultivares de cana-de-açúcar.. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2009, Belo Horizonte. **SBAGRO**, v. 1, 2009.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C. Estimativa do rendimento de soja usando dados do modelo do ECMWF em um modelo agrometeorológico-espectral no Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 279-286. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.16.16>>. (acesso em: 20 Julho 2010).

MELO, R.W. de; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; DUCATI, J.R. An agrometeorological spectral model to estimate soybean yield, applied to Southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, p.4013-4028, 2008.

MICALE, F.; G. GENOVESE. **Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System**. Meteorological data collection, processing and analysis. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, vol. 1, 102p, 2004.

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. **Technical specifications**, 2010. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. (acesso em: 28 Julho 2010).

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V. Imagens de coeficiente de qualidade (Quality) e de confiabilidade (Reliability) para seleção de pixels em imagens de NDVI do sensor Modis para monitoramento da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba-PR. **Anais**. São José dos

Campos: INPE, 2011. p. 0547-0552. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0376.pdf> >. Acesso em: 30.maio.2011.

MORAES, R.A.; ROCHA, J.V.; ROLIM, G.; LAMPARELLI, R.A.C.; MARTINS, M. Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o Estado de São Paulo. **Braslian Journal of Irrigation and Drainage (IRRIGA)**, v.3, n.17, p.397-407, 2012b

MOREIRA, Mauricio. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3ª ed. Viçosa/MG: UFV, 320p, 2007.

NEVES M. C.; LUIZ, A. J. B. **Distribuição Espacial da Cultura de Café no Estado de São Paulo**. Jaguariúna-SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Meio Ambiente - número 40).

OLIVEIRA, A. R.; SANTOS, R. S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M. H. P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. Revista **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (AGRIAMBI)**, v. 16, n.5, p.549—557, 2012.

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

PERSON, A.; GRAZZIANI, F. **User guide to ECMWF forecast products**. Meteorological Bulletin M3.2, version 4, mar, 2007.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto – INPE, São José dos Campos, SP, 90p, 2006.

PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2015, Doiânia, GO. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 0217-0224. DVD, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <

<http://martedpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.12/doc/217.pdf> >. Acesso em: 30.maio.2012.

PMGCA. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar. UFSCar. <<http://pmgca.dbv.cca.ufscar.br/index.php>>. (acesso 15 junho 2010).

POTGIETER, A. B.; APAN, A.; DUNN, P.; HAMMER, G. Estimating crop area using seasonal time series of enhanced vegetation index from Modis satellite imagery. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 58, p. 316-325, 2007.

RAFAELLI, D. R.; MOREIRA, M. A. **Deteção de geada em lavouras de café**. p.145-155. Org: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos/SP: Parêntese, 423p, 2007.

ROMON V. T.. **Impacto das mudanças climáticas na produção de cana no estado de São Paulo, utilizando modelo de simulação**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, SP, 98p., 2008.

RAMME, F. L. P.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. Perfis temporais NDVI Modis, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n.3, p.480-494, 2010.

REED, B. C.; BROWN, J. F.; VANDERZERR, D.; LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J. W.; OHLEN, D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of Vegetation Science**. Sweden, v.5, p. 703-714, 1994.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor *MODIS* associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.42, n.1, p.73-80, janeiro, 2007.

RIZZI, R.; RISSO, J.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDES, S. L. Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens Modis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal, RN. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 0387-0394. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <

<http://martedpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.16.18.50.57/doc/387-394.pdf> >.
Acesso em: 15.maio.2012.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Unesp Botucatu, Instituto de Biociências, Botucatu, 1995.

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.

RUDORFF, B.F.T. and BATISTA, G.T. Yield Estimation of Sugarcane Based on Agrometeorological-Spectral Models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192, 1990.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Coord.). **Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 425p, 2007a.

RUDORFF, C. M.; SUGAWARA, L. M.; VIEIRA, C. A. O.; RIZZI, R. **Classificação de soja pelo método de superfícies de resposta espectro-temporal**. p.111-121. Org: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos/SP: Parêntese, 423p, 2007b.

RUDORFF, C. M.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; VIEIRA, C. A. O. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n.1, p. 118-125, 2007.

RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; AGUIAR, D. A.; GUSSO, A. SILVA, W. F.; FREITAS, R. M. Temporal series of EVI/MODIS to identify land converted to sugarcane. P. Iv-252 – iv-255. **In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009**. vol.4, no., pp.IV-252-IV-255, 12-17 July 2009 doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417326 Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5417326&isnumber=5417310>. Acesso em 30 setembro, 2012.

SANCHES, I. D. A., EPIPHANIO, J. C. N., FORMAGGIO, A. R. **Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat**. Agric., v. 52, n. 1, 14p, São Paulo, 2005.

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. Avaliação da relação seca/produktividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 26, n. 2, 2011.

SERIO, L.; SPESCHA, L.; MURPHY, G.M. Validación de las precipitaciones decádicas de la región pampeana na estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. p.45-52. In: 2° INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA, 2006. **Proceedings...** Montevideo: South America Scientific Network on Crop Monitoring and Forecasting, 2006.

SFERRA, H. H. ; ÂNGELA, M. C. ; CORRÊA, J. . Conceitos e Aplicações de Data Mining. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba-SP, v. 11, n. 22, p. 19-34, 2003.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. . Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Revista Biociência**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 7-14, 2001.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Spectral Variables, Growth Analysis and Yield of Sugarcane. **Science Agricola**, v. 62, n. 3, p. 199-207, 2005.

SOARES, J.V.; BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E.. **Histórico e descrição**. p.3-21. Org: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos/SP: Parêntese, 423p, 2007.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, C. C.; PICOLI, M. C. A.; ADAMI, M. Estimativa de produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) por meio de técnica de análise de regressão linear múltipla. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 435-442. CD-ROM.

TAN, B.; MORISETTE, J.T.; WOLFE, R.E.; GAO, F.; EDERER, G.A.; NIGHTINGALE, J.; PEDELTY, J.A. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology

metrics from MODIS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.4, n.2, p. 361–371, 2011

UNICA, (União da Indústria de Cana-de-açúcar) Dados e Cotações. Estatísticas. Available online: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>> (acesso em 22 Junho 2010).

XAVIER A.C., RUDORFF, B. F. T., SHIMABUKURO, Y. E., BERKA L.M.S., MOREIRA M.A. Multi-temporal analysis of Modis data to classify sugarcane crop. **Inteational Journal of Remote Sensing**. v. 27, n.3-4, p.755-768, 2006.

XIAO X. M.; BOLES, S.; LIU J.; ZHUANG, D.; FROLKING, S.; LI, C. S.; SALAS, W. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal Modis images. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.480-492, 2005.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time-series Modis 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, p. 209-310, 2007.

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

WILLMOTT, C. J., MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82, 2005.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves. **Plant Physiology**, v. 47, p. 656-662, 1971.

YI, J. L. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; QUINTANILHA, J. A. Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens Modis. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n.3, p.753-763, 2007.

ZHANG, X., FRIEDL, M.A., SCHAAF, C.B., STRAHLER, A.H., HODGES, J.C.F., GAO, F., REED, B.C., HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using Modis. **Remote Sensing of Environment**. v.84, p.471–475, 2003.