



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.08.14.39-TDI

## **VARIAÇÃO INTERANUAL DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇUCAR POR MEIO DE UM MODELO AGRONÔMICO**

Luciana Miura Sugawara

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 04 de  
novembro de 2010 .

URL do documento original:

<[http://urlib.net/ 8JMKD3MGP7W/38CSKHB](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38CSKHB) >

INPE  
São José dos Campos  
2010

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivêca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.08.14.39-TDI

## **VARIAÇÃO INTERANUAL DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇUCAR POR MEIO DE UM MODELO AGRONÔMICO**

Luciana Miura Sugawara

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 04 de  
novembro de 2010 .

URL do documento original:

<[http://urlib.net/ 8JMKD3MGP7W/38CSKHB](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38CSKHB) >

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Sugawara, Luciana Miura .  
Su32v      Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-  
açúcar por meio de um modelo agrônomo / Luciana Miura Su-  
gawara. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xxii+ 92 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.08.14.39-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Naci-  
onal de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientador : Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff.

1. Sensoriamento remoto. 2. Modelo agrônomo . 3. Variação  
interanual da produtividade agrícola. 4. Cana-de-açúcar. I.Título.

CDU 528.811(815.6)

---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

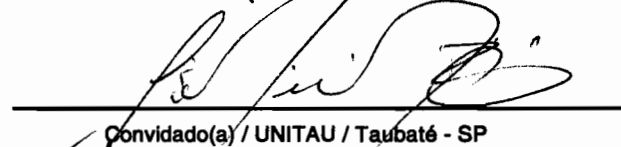
Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

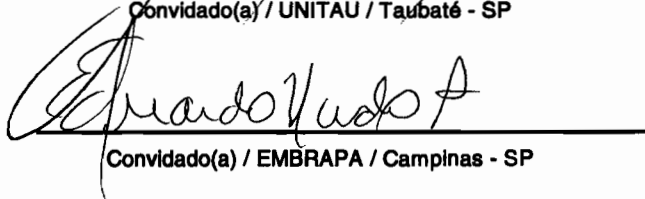
Dra. Angélica Giarolla

  
Membro da Banca / CPTEC/INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Getúlio Teixeira Batista

  
Convidado(a) / UNITAU / Taubaté - SP

Dr. Eduardo Delgado Assad

  
Convidado(a) / EMBRAPA / Campinas - SP

Aluno (a): Luciana Miura Sugawara

São José dos Campos, 04 de novembro de 2010



*“Quando estiver em dificuldade, e pensar em desistir: lembre-se dos obstáculos que já superou - olhe para trás.*

*Se tropeçar e cair, levante. Não fique prostrado: esqueça o passado - olhe para frente.*

*Ao sentir-se orgulhoso, por alguma realização pessoal: sonde suas motivações - olhe para dentro.*

*Antes que o egoísmo o domine, enquanto seu coração é sensível, socorra os que o cercam - olhe para os lados.*

*Na escalada, rumo às altas posições, no afã de concretizar seus sonhos, observe se não está pisando em alguém - olhe para baixo.*

*Em todos os momentos da vida, seja qual for sua atividade, busque a aprovação de Deus - olhe para cima!”*

*Autor desconhecido*



*A meus pais Jioji e Maria,  
ofereço.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por esta oportunidade de crescimento espiritual e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff pela amizade, pelos preciosos ensinamentos, pela confiança, pelo incentivo, pelas oportunidades de trabalho e por aceitar o desafio de me orientar novamente.

Ao Dr. Yosio Edemir Shimabukuro e à Dra Angélica Giarolla pela amizade e pelas valiosas sugestões e discussões.

Ao Dr. Eduardo Delgado Assad e ao Dr. Getúlio Teixeira Batista pelas valiosas contribuições para a melhoria do documento e pelas excelentes discussões.

Ao Dr. Maurício Alves Moreira pela amizade, pelos ensinamentos e pelo empenho em tornar o estágio docência possível de ser realizado.

Ao Dr. Gilberto Fisch pela amizade e pelos ensinamentos transmitidos durante o estágio docência.

Aos professores do curso de Sensoriamento Remoto por contribuírem na minha formação profissional.

A meus pais Jioji e Maria, meus irmãos Suzana, Sandra e Eduardo, meu cunhado Edgar e meus sobrinhos Gustavo e Laura, pelo carinho, por me dar forças para continuar em frente e por tornar esta caminhada mais suave.

Aos meus amigos Marcos Adami, Liana, Rizzi, Giselle, André Lima, Ramon, Egídio, Vagner, Adalberto e Ericson, pelo companheirismo nas horas difíceis, pelos ensinamentos, pelas discussões e pelos momentos de descontração.

Aos integrantes do Laboratório de Sensoriamento Remoto em Agricultura e Floresta, pela amizade, pelo companheirismo, pelos ensinamentos e pelos momentos de descontração.

Aos colegas do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto pelo companheirismo e pelos ensinamentos.

Aos caratecas Alessandro, Junior, Eduardo Araújo, Mariana, Eduardo Quintela, Anita, Leonardo, Iury e Germano, pela amizade, pelos ensinamentos, pelos

momentos de descontração e por proporcionar momentos de treinos intensos e amistosos.

Aos radioamadores Elias, Fernandinho, Harry e Michael pela amizade e pelo incentivo.

Aos fisioterapeutas Christiane e Marco Antônio, pela amizade, pelos inúmeros “consertos” e pelos momentos de relaxamento e terapia.

Ao professor de inglês Marco Aurélio, pela amizade, pelos ensinamentos e por proporcionar momentos de descontração e terapia.

À União da Indústria de Cana-de-açúcar e ao Centro de Tecnologia Canavieira pelo fornecimento de informações sobre a cana-de-açúcar e pelas sugestões e discussões.

Ao MSc. Rildo Gonçalves de Moura pela disponibilização dos dados de previsão do modelo regional Eta.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo fornecimento dos subsídios necessários à realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de pesquisa.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Modelos agronômicos para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar foram desenvolvidos e adaptados nas últimas décadas, mas seu uso permanece restrito à área acadêmica. Os recentes avanços observados nas geotecnologias, em especial no que se refere aos Sistemas de Informação Geográfica e às imagens de sensoriamento remoto, indicam que existe potencial para aprimorar estes modelos visando aplicações operacionais. O objetivo deste trabalho foi adaptar um modelo agronômico para estimar indicadores da variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Estes indicadores podem auxiliar especialistas do setor canavieiro com informações espaciais referentes às condições de crescimento da cultura. As variáveis de entrada do modelo foram estimadas com o uso de dados do sensor Modis e de dados meteorológicos do modelo de previsão regional Eta, que foram ajustados para intervalos regulares de 16 dias. O estudo foi conduzido no estado de São Paulo nos anos safra 2006/07 a 2008/09. As séries temporais de NDVI provenientes das composições temporais de 16 dias do produto MOD13Q1 foram filtradas com o uso da técnica “4253H, Twice”. O fator de estágio de corte da cana-de-açúcar foi determinado com base nos valores médios de produtividade agrícola. Uma grade amostral de pixels puros de 250x250 m foi gerada e estratificada com base nos estágios de corte da cana-de-açúcar. Esta grade foi utilizada para o cálculo da produtividade pelo modelo agronômico em 12 períodos de crescimento da cana-de-açúcar a cada 16 dias, de outubro de um ano até março do ano seguinte. O indicador de produtividade agrícola (IPA) da cana-de-açúcar foi calculado com base na produtividade agrícola da safra atual e anterior, por meio do modelo para todo estado de São Paulo, para as regiões administrativas (RA), para os estratos e para as unidades amostrais. Os resultados mostraram que as séries temporais do NDVI foram capazes de expressar as diferenças na produtividade agrícola em função do estágio de corte. Diferentes valores de IPA foram observados para as RA e para as unidades amostrais, o que permite realizar a análise da variação espacial dentro do estado. O IPA estimado para o estado de São Paulo foi de 0,015 do ano safra 2006/07 para 2007/08 e de -0,062 de 2007/08 para 2008/09. Estes valores concordam apenas parcialmente com outras estatísticas agrícolas disponíveis. Isto indica que o método proposto ainda precisa ser aprimorado. Além disso, é recomendado que o IPA seja utilizado por especialistas como ferramenta auxiliar na composição da estimativa de produtividade agrícola da cana-de-açúcar.



# **INTERANNUAL SUGARCANE YIELD VARIATION ESTIMATED BY AN AGRONOMIC MODEL**

## **ABSTRACT**

Agronomic models for sugarcane yield estimation have been developed and adapted over past decades but their use have been limited to academic and research purposes. Recent advancements in geotechnologies, particularly in Geographic Information Systems and remote sensing images, present new potentials to improve these models for operational applications in crop yield estimation. The present research has the objective to adapt an agronomic model for estimating an interannual indicator of sugarcane yield variation. This indicator should assist sugarcane specialists with spatial information about the crop during its major growth period. Key input variables for the model were estimated from MODIS data and meteorological data forecasted by Eta model, adjusted to each 16-day period. The study was carried out in São Paulo state from 2006/07 to 2008/09 crop years. NDVI time series from 16-day composite of MOD13Q1 product were filtered using the “4253H, Twice” method. A sugarcane cutting stage factor was determined based on average yields. An unmixed 250x250 m sugarcane stratified sampling grid was generated based on sugarcane cutting stage. This grid was used to run the model for 12 sugarcane growing periods 16 days apart, from October to March. The sugarcane yield indicator (IAP) was calculated based on actual and previous crop yield estimated by the agronomic model for the entire São Paulo State, for the Administrative Regions (ADR) within the state, for the sugarcane cutting stages, and for the sampling units of the sampling grid. Results showed that NDVI time series were able to express expected differences in yield due to cutting stage. Different IAP values were observed for ADRs as well as for sampling units of the sampling grid allowing the analysis of IPA spatial variation throughout the state. The estimated IAP for São Paulo state was equal to 0.015 from 2006/07 to 2007/08 and equal to -0.062 from 2007/08 to 2008/09. These values are only partially in agreement with other available agricultural statistics. Which indicates that further studies are needed to improve the proposed method. It is recommended that crop yield sugarcane analysts start using the IAP approach as ancillary data to improve their crop yield estimation method with the use of geotechnologies.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <u>Pág.</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 2.1 - Ciclo fenológico da cana-de-açúcar.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 6           |
| Figura 3.1 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no ano safra 2008/09.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 25          |
| Figura 3.2 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no município de Cosmópolis - SP, nos anos safra: a) 2003/04; b) 2004/05; c) 2005/06; d) 2006/07; e) 2007/08 e; f) 2008/09.....                                                                                                                                                                                                   | 27          |
| Figura 3.3 - Diagrama esquemático de funcionamento do filtro “4253H, Twice”.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29          |
| Figura 3.4 - Resolução espacial das variáveis de entrada do modelo agrônômico.....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 37          |
| Figura 3.5 - Relação entre o índice de área foliar e o fator de compensação de crescimento.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 41          |
| Figura 4.1 - Detalhe das amostras coletadas com base no mapa das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, gerado pelo projeto Canasat (INPE, 2010). .....                                                                                                                                                                                                                             | 49          |
| Figura 4.2 - Distribuição das amostras por estrato no estado de São Paulo, com destaque para a região administrativa de Barretos.....                                                                                                                                                                                                                                            | 50          |
| Figura 4.3 - Perfis temporais de um pixel de NDVI proveniente do produto MOD13Q1 sem filtragem e com filtragem entre os anos de 2005 e 2008, a duração dos 12 períodos de avaliação em cada ano safra e os estágios de corte da cana-de-açúcar, pertencentes ao extrato: a) Expansão 2003; b) Expansão 2006; c) Reforma 2006 e; d) Expansão 2004, com filtragem ineficiente..... | 51          |
| Figura 4.4 - NDVI acumulado nos 12 períodos avaliados por ano safra em cada estrato (Tabela 3.1), nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar amostradas no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2006/07 e; c) 2008/09.....                                                                                                                                                            | 53          |
| Figura 4.5 - Perfil temporal do NDVI dos 12 períodos avaliados (Tabela 3.2) em três anos safra no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.....                                                                                                                                                                                                                 | 55          |
| Figura 4.6 - Curva teórica da relação entre o NDVI e o IAF e o histograma dos valores de NDVI das amostras coletadas em 12 períodos para os anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. a) Método 1 (CHOUDHURY et al., 1994; RIZZI; RUDORFF, 2007); b) Método 2 (XAVIER; VETORAZZI, 2004); c) Método 3 (EL HAJJ et al., 2007). .....                                                  | 56          |
| Figura 4.7 - Perfil temporal do IAF resultante da utilização do Método 1 nos 12 períodos avaliados (Tabela 3.2) em cada ano safra no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.....                                                                                                                                                                              | 57          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.8 - Precipitação acumulada média e temperaturas mínima e máxima médias por período, provenientes de 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (Tabela A.1) e as estimativas do modelo regional Eta correspondentes às localidades destas estações: a) ano safra 2006/07; b) ano safra 2007/08; c) ano safra 2008/09 e; d) média de todas os anos safra avaliados. .... | 58 |
| Figura 4.9 - Precipitação acumulada média nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09: a) observadas em 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (Tabela A.1) e; b) estimadas pelo modelo regional Eta nas localidades apresentadas na Tabela A.1.....                                                                                                                           | 59 |
| Figura 4.10 - Histograma dos valores de indicador de produtividade agrícola das amostras de áreas de cultivo de cana-de-açúcar avaliadas no estado de São Paulo nos anos safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09. ....                                                                                                                                                                               | 63 |
| Figura 4.11 - Indicador de penalização acumulado nas amostras das áreas de cultivo com cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos períodos avaliados (Tabela 3.2) dos anos safras: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09. ....                                                                                                                                                                                           | 65 |
| Figura 4.12 - Indicador de produtividade agrícola por estrato nas amostras das áreas plantadas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.....                                                                                                                                                                                                         | 66 |
| Figura 4.13 - Indicador de produtividade agrícola por região administrativa do estado de São Paulo do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 67 |
| Figura 4.14 - Distribuição espacial do indicador de produtividade agrícola do ano safra 2006/07 para 2007/08 em diversas aproximações de visualização e a tabela associada no nível de detalhe de amostra. O valor em destaque na cor vermelha na tabela é o valor associado às diversas classes de indicador de produtividade agrícola. ....                                                                          | 69 |
| Figura 4.15 - Indicador de penalização para amostras de Planta nos anos safra: a) 2007/08 para o estrato 22; b) 2007/08 para o estrato 32; c) 2008/09 para o estrato 21 e; d) 2008/09 para o estrato 31.....                                                                                                                                                                                                           | 70 |
| Figura 4.16 - Variação do indicador de produtividade agrícola de acordo com a simulação de valores de precipitação nas amostras do estrato 35 do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.....                                                                                                                                                                                                    | 72 |

- Figura 4.17 - Variação do indicador de penalização de acordo com a simulação de valores de precipitação nas amostras do estrato 35, nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09: a) Simulação 1: -50%; b) Simulação 2: -20%; c) Simulação 3: -10%; d) Simulação 4: -5%; e) Simulação 5: 0%; f) Simulação 6: +5%; g) Simulação 7: +10%; h) Simulação 8: +20% e; i) Simulação 9: +50%.....73
- Figura 4.18 - Variação do indicador de produtividade agrícola ao longo dos períodos analisados (Tabela 3.2), do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 com o uso de *ky variável* (Tabela 3.3); b) 2006/07 para 2007/08 com o uso de *ky fixo* em todos os períodos; c) 2007/08 para 2008/09 com o uso de *ky variável* e; d) 2007/08 para 2008/09 com o uso de *ky fixo* em todos os períodos. ....75
- Figura 4.19 - Indicador de penalização acumulado calculado com o valor de *ky fixo* nas amostras das áreas de cultivo com cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos períodos avaliados (Tabela 3.2) dos anos safras: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09. ....76



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <u>Pág.</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabela 2.1 - Comparação entre as abordagens estatística e física .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 14          |
| Tabela 2.2 - Dados de produtividade agrícola da cana-de-açúcar do estado de São Paulo divulgados por diversas entidades para os anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. ....                                                                                                                                                 | 23          |
| Tabela 2.3 - Anos safra considerados pelas entidades que fornecem dados de produtividade agrícola da cana-de-açúcar e os anos safra correspondentes aos utilizados neste trabalho. ....                                                                                                                                     | 24          |
| Tabela 3.1 - Estratos e estágios de corte das áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. ....                                                                                                                                                                    | 35          |
| Tabela 3.2 - Período de avaliação selecionado e as respectivas datas dos períodos das composições de 16 dias das imagens Modis. ....                                                                                                                                                                                        | 36          |
| Tabela 3.3 - Fator de resposta à produtividade (ky). ....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 40          |
| Tabela 3.4 - Fator de estágio de corte da cana-de-açúcar (Fe). ....                                                                                                                                                                                                                                                         | 42          |
| Tabela 3.5 - Coeficiente da cultura (kc) e profundidade do sistema radicular (D). ....                                                                                                                                                                                                                                      | 43          |
| Tabela 3.6 - Condições de simulação dos valores de precipitação pluviométrica com base nos valores estimados pelo modelo regional Eta. ....                                                                                                                                                                                 | 46          |
| Tabela 4.1 - Quantidade de amostras por estrato e o total de amostras obtidas para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. ....                                                                                                                             | 47          |
| Tabela 4.2 - Análise de regressão por meio da técnica de Bootstrap entre a precipitação pluviométrica, temperatura mínima e temperatura máxima dos dados de 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas e as estimativas do modelo Eta nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. .... | 60          |
| Tabela 4.3 - Classificação da variação interanual da produtividade agrícola de acordo com os valores do indicador de produtividade agrícola da cana-de-açúcar. ....                                                                                                                                                         | 62          |
| Tabela 4.4 - Indicador de produtividade agrícola médio para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, calculado com base no modelo agrônomo, IBGE, Conab, IEA, Unica/Canasat e CTC, nos anos safra 2006/07 para 2007/08 e 2007/08 para 2008/09. ....                                                    | 63          |
| Tabela A.1 - Lista das estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas utilizadas na comparação com os dados de previsão do modelo regional Eta. ....                                                                                                                                         | 91          |



## SUMÁRIO

|                                                                                | <u>Pág.</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                      | <b>1</b>    |
| <b>1.1 Hipótese .....</b>                                                      | <b>3</b>    |
| <b>1.2 Objetivos .....</b>                                                     | <b>3</b>    |
| 1.2.1 Geral.....                                                               | 3           |
| 1.2.2 Específicos .....                                                        | 3           |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                           | <b>5</b>    |
| <b>2.1 Caracterização da cultura .....</b>                                     | <b>5</b>    |
| 2.1.1 Aspectos gerais do ciclo fenológico e do manejo .....                    | 5           |
| 2.1.2 Fatores que influenciam a produtividade agrícola .....                   | 8           |
| <b>2.2 Índice de área foliar .....</b>                                         | <b>11</b>   |
| <b>2.3 Relação entre o índice de vegetação e o índice de área foliar .....</b> | <b>12</b>   |
| <b>2.4 Dados do sensor Modis .....</b>                                         | <b>15</b>   |
| <b>2.5 Dados meteorológicos .....</b>                                          | <b>17</b>   |
| <b>2.6 Estimativa da produtividade agrícola .....</b>                          | <b>19</b>   |
| 2.6.1 Modelo agrônomo.....                                                     | 19          |
| 2.6.1.1 Aspectos da utilização.....                                            | 19          |
| 2.6.1.2 Aspectos da espacialização .....                                       | 21          |
| 2.6.2 No Brasil.....                                                           | 22          |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                              | <b>25</b>   |
| <b>3.1 Área de estudo .....</b>                                                | <b>25</b>   |
| <b>3.2 Dados de sensoriamento remoto e índice de área foliar .....</b>         | <b>28</b>   |
| <b>3.3 Dados meteorológicos .....</b>                                          | <b>30</b>   |
| <b>3.4 Outros dados .....</b>                                                  | <b>33</b>   |
| <b>3.5 Amostragem e período de avaliação.....</b>                              | <b>34</b>   |
| <b>3.6 Avaliação dos dados estimados pelo modelo regional Eta.....</b>         | <b>38</b>   |
| <b>3.7 Variação interanual da produtividade agrícola .....</b>                 | <b>39</b>   |
| 3.7.1 Modelo agrônomo.....                                                     | 39          |
| 3.7.2 Indicador de produtividade agrícola e indicador de penalização .....     | 43          |
| <b>3.8 Análise preliminar de sensibilidade do modelo agrônomo .....</b>        | <b>45</b>   |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                          | <b>47</b>   |
| <b>4.1 Amostragem e resolução espacial .....</b>                               | <b>47</b>   |
| <b>4.2 Série temporal do NDVI .....</b>                                        | <b>51</b>   |

|            |                                                                                                                          |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.3</b> | <b>Índice de área foliar e fator de compensação do crescimento.....</b>                                                  | <b>55</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Avaliação dos dados estimados pelo modelo regional Eta.....</b>                                                       | <b>58</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Variação interanual da produtividade agrícola .....</b>                                                               | <b>61</b> |
| 4.5.1      | Para o estado de São Paulo .....                                                                                         | 62        |
| 4.5.2      | Por estrato.....                                                                                                         | 65        |
| 4.5.3      | Por região administrativa .....                                                                                          | 67        |
| 4.5.4      | Por unidade amostral .....                                                                                               | 68        |
| <b>4.6</b> | <b>Indicador de penalização intranual da produtividade agrícola .....</b>                                                | <b>69</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Análise preliminar de sensibilidade do modelo agrônômico .....</b>                                                    | <b>71</b> |
| 4.7.1      | Precipitação pluviométrica .....                                                                                         | 71        |
| 4.7.2      | Fator de resposta à produtividade .....                                                                                  | 74        |
| <b>4.8</b> | <b>Considerações sobre o uso operacional do indicador de<br/>produtividade agrícola .....</b>                            | <b>77</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                                                                                  | <b>79</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                                                  | <b>81</b> |
|            | <b>APÊNDICE A - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO CENTRO<br/>INTEGRADO DE INFORMAÇÕES<br/>AGROMETEOROLÓGICAS(CIIAGRO) .....</b> | <b>91</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os modelos agronômicos para a estimativa de produtividade de culturas agrícolas representam de forma simplificada os principais processos envolvidos na formação da produtividade, por meio de equações matemáticas. Há cerca de quarenta anos surgiram os primeiros modelos de simulação do crescimento de plantas com o uso de computadores (BOUMAN et al., 1996; PASSIOURA, 1996; SINCLAIR; SELIGMAN, 1996). No início da década de 80 do século passado, os dados obtidos em faixas espectrais do espectro eletromagnético por sensores remotos orbitais, começaram a ser incorporados nesses modelos. Um dos trabalhos pioneiros no Brasil com o uso desta metodologia para a cana-de-açúcar foi publicado por Rudorff (1985). No atual estágio de inovação tecnológica, estes modelos podem ser espacializados por meio do uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (HARTKAMP et al., 1999; DANG et al., 2000; BERKA et al., 2003; RIZZI; RUDORFF, 2007).

Os dados de sensoriamento remoto (SR) apresentam características favoráveis para estimar variáveis de entrada para os modelos agronômicos, em função de possibilitar o monitoramento de grandes áreas e da periodicidade com que estes dados podem ser obtidos. A obtenção destas variáveis deve estar aliada ao conhecimento dos aspectos fenológicos, das necessidades climáticas e do manejo da cultura, que são informações imprescindíveis na modelagem da produtividade agrícola (DORIGO et al., 2007).

Berka et al. (2003) e Rizzi e Rudorff (2007) utilizaram o modelo agronômico da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (DOORENBOS e KASSAM, 1979) para realizar estimativas de produtividade agrícola da soja de forma espacializada. Rizzi e Rudorff (2007) inseriram dados de SR neste modelo por meio do fator de compensação do crescimento ( $F_{cc}$ ), que está relacionado ao índice de área foliar (IAF). Os autores calcularam o IAF a partir de séries temporais do “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) (ROUSE et al., 1974), obtidos do produto MOD13Q1, gerados a partir

de dados do sensor “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (Modis), a bordo do satélite Terra (RUDORFF et al., 2007).

Além de dados meteorológicos e de SR, outras informações, relacionadas à tendência tecnológica e ao mercado, são importantes na composição da estimativa da produtividade agrícola; contudo, elas não são incorporadas em modelos agronômicos.

Segundo Abdel-Rahman e Ahmed (2008), diversos trabalhos foram realizados com o intuito de estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar com base em modelagem matemática e dados de SR; porém, nenhuma delas resultou em uma metodologia viável para o uso operacional. Os autores ainda relatam que não existem modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar que gerem estimativas confiáveis; pois, de acordo com Batchelor et al. (2002), os modelos têm limitações para estimar perdas provocadas pelos diversos fatores que compõem a produtividade agrícola.

Os esforços despendidos têm se concentrado no estabelecimento de relações diretas de variáveis meteorológicas e de SR com a produtividade agrícola; porém, os resultados alcançados até agora frustraram as expectativas geradas em torno do potencial destes modelos para estimar a produtividade agrícola de modo operacional. Todavia, é inegável que um modelo agronômico especializado fornece valiosas informações relacionadas com a produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Portanto, se por um lado estes modelos são limitados, por outro lado fica a impressão de que eles não vêm sendo corretamente utilizados. Neste sentido, o presente trabalho visa estabelecer novos parâmetros extraídos de um modelo agronômico especializado, que auxiliem os especialistas do setor canavieiro a aprimorarem as estimativas de produtividade agrícola.

## **1.1 Hipótese**

Dados de sensoriamento remoto e meteorológicos incorporados em um modelo agrônomo detectam a variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Adaptar um modelo agrônomo para estimar indicadores da variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

### **1.2.2 Específicos**

- a) Ajustar fatores de ponderação no modelo agrônomo em função do estágio de corte da cana-de-açúcar;
- b) Estimar o índice de área foliar com dados de sensoriamento remoto para ser utilizado no modelo agrônomo;
- c) Avaliar as estimativas realizadas pelo modelo regional Eta para a precipitação pluviométrica e as temperaturas mínima e máxima.
- d) Gerar o indicador de penalização da produtividade agrícola máxima para representar a variação intranual da produtividade agrícola;
- e) Gerar o indicador de produtividade agrícola para representar a variação interanual da produtividade agrícola;
- f) Analisar a sensibilidade do modelo agrônomo de modo preliminar quanto à precipitação pluviométrica e ao fator de resposta à produtividade.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Caracterização da cultura**

A cana-de-açúcar é uma gramínea originária da Nova Guiné, cuja importância econômica no Brasil remonta à época da colonização portuguesa (MOZAMBANI et al., 2006).

Segundo Machado (1987), o sistema produtivo desta gramínea é composto por dois subsistemas: a) produção (folhas fotossinteticamente ativas), escoamento e distribuição do produto fotossintetizado e consumo (raízes, colmos, folhas jovens, tecidos meristemáticos e órgãos reprodutores) e; b) acúmulo e armazenamento de sacarose (nos colmos), denominada de maturação.

Segato et al. (2006a) relataram que a cana-de-açúcar está adaptada para o cultivo em regiões tropicais, mas o conhecimento de seu ciclo é de suma importância para que a máxima produtividade seja alcançada. Segundo as autoras, a máxima produtividade está fundamentada na interação entre a planta, o ambiente de produção e o manejo.

Os dois sub-tópicos seguintes mostram alguns aspectos da cultura de cana-de-açúcar e os fatores que podem influenciar a sua produtividade.

#### **2.1.1 Aspectos gerais do ciclo fenológico e do manejo**

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene com um ciclo que dura em torno de quatro a cinco cortes (SALOMÉ et al., 2007) e se propaga vegetativamente, por meio da brotação de suas gemas (SEGATO et al., 2006a).

As informações apresentadas neste item são baseadas em Segato et al. (2006a), salvo citações apresentadas no decorrer do texto.

A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático do ciclo fenológico da cultura da cana-de-açúcar. O ciclo inicia com o plantio da muda (tolete), que brota,

perfilha, matura e recebe o primeiro corte, ciclo este que é denominado de cana-planta. No ciclo seguinte, ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo ciclo, denominado de cana-soca. A cada ciclo ocorre uma perda na produtividade agrícola e os ciclos se repetem em intervalos anuais até que a lavoura não seja mais rentável economicamente, quando a cultura passa pelo manejo denominado de reforma e o ciclo reinicia com o plantio de uma nova muda.

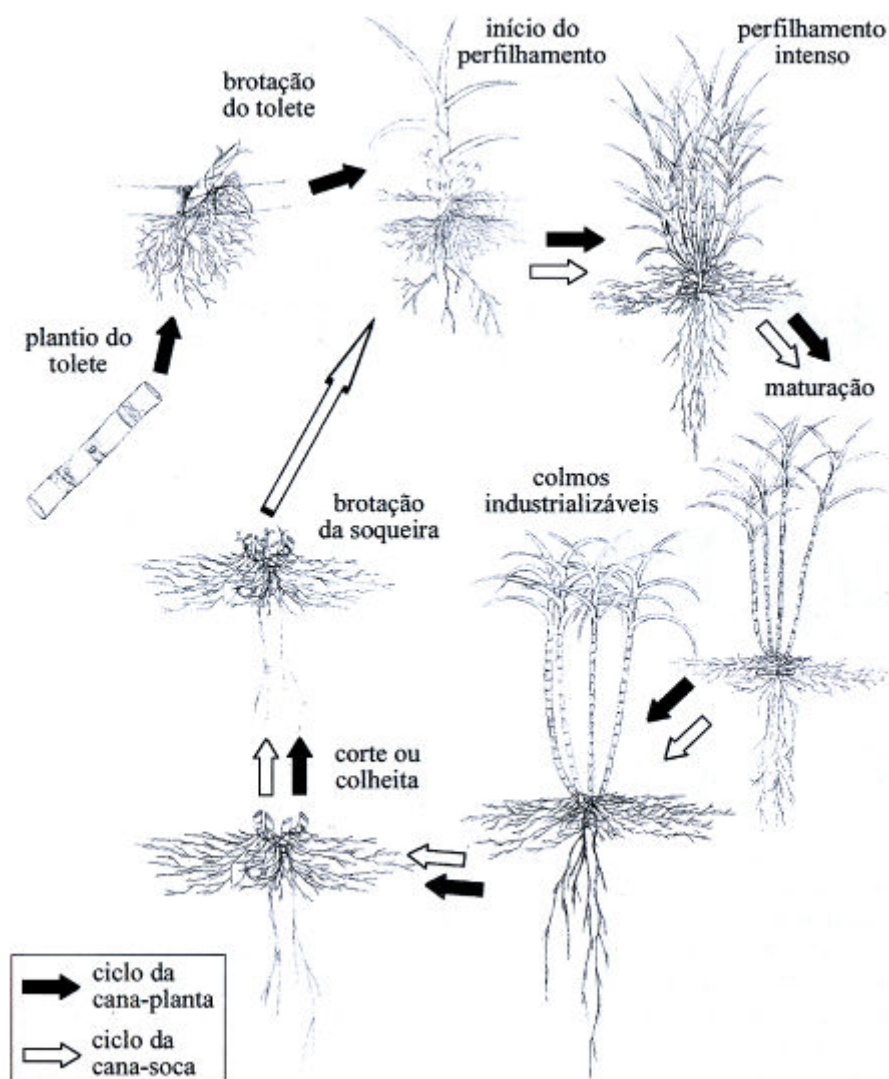


Figura 2.1 - Ciclo fenológico da cana-de-açúcar.  
Fonte: Segato et al. (2006a).

A fase reprodutiva é evitada com o plantio de variedades não floríferas, pois o florescimento reduz a produção de biomassa e conseqüentemente a de sacarose.

O ciclo da cana-planta dura em média 12 meses para a cana-planta de ano e 14 a 21 meses para a cana-planta de ano e meio. Essa duração depende da época de plantio.

Em função do clima da região Centro-Sul do Brasil, existem duas épocas preferenciais para o plantio da cana-de-açúcar:

- a) *Primeira época*, plantio de setembro a novembro, que coincide com o início da estação chuvosa. O plantio nesta época do ano origina a cana-planta de ano, que vegeta ininterruptamente até abril (em torno de 8 meses), para então amadurecer (por um período em torno de 4 meses). Segundo Casagrande (1991), a cana-planta de ano tem o seu crescimento máximo de novembro a abril, com a possibilidade de colheita a partir de julho, em função da variedade utilizada;
- b) *Segunda época*, plantio de janeiro a início de abril, durante a estação chuvosa. Nestas condições, a cana-de-açúcar tem o crescimento favorecido nos primeiros meses e limitado em seguida, durante a estação seca, no outono/inverno (abril a agosto). A planta volta a vegetar com intensidade entre setembro e abril e amadurece para ser colhida na segunda estação de inverno, ou seja, o seu ciclo é de cana-planta de ano e meio. Neste caso, de acordo com Casagrande (1991), o maior crescimento da cultura se dá nos meses de outubro a abril, com o pico máximo de crescimento de dezembro a abril.

Além destas duas épocas, ainda existe uma terceira, denominada de plantio de inverno (junho, julho e agosto), onde a irrigação ou a fertirrigação é necessária, pelo menos na fase inicial de crescimento vegetativo.

Penariol e Segato (2007) relataram que existem dois tipos de prática de reforma de canaviais adotada após a retirada das soqueiras: a) sem rotação de culturas, quando o plantio das novas mudas é realizado apenas com a correção química e a fertilização necessárias ao solo e; b) com rotação de culturas, quando, em geral, uma planta da família das leguminosas é semeada para auxiliar na “recuperação” do solo, e o plantio das mudas é realizado logo após a colheita desta leguminosa. Segundo os autores, a rotação de culturas traz diversos benefícios para o canavial e deve ser adotada por todos os produtores.

A colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada das seguintes maneiras: a) manual, com a queima da palha ou sem queima para a colheita das mudas e, b) mecanizada, com ou sem queima da palha. A queima da palha facilita tanto a colheita manual quanto a mecanizada, mas causa prejuízos ao meio ambiente.

Uma peculiaridade da cultura é a presença de cana-bisada em alguns anos safra, ou seja, a cana-de-açúcar que não foi colhida ao longo de um ano safra e é colhida no ano safra seguinte. Isso ocorre principalmente por questões climáticas que impedem a colheita, ou quando a disponibilidade de cana-de-açúcar é maior do que a capacidade de moagem da indústria.

### **2.1.2 Fatores que influenciam a produtividade agrícola**

O principal produto de valor comercial da cana-de-açúcar é a sacarose, que é utilizado na indústria como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool (SEGATO et al., 2006b).

No cultivo da cana-de-açúcar são consideradas duas produtividades: a) agrícola e; b) industrial. A produtividade agrícola é o resultado das características genéticas, da densidade populacional, das condições climáticas e edáficas, do manejo empregado e da possível ação de pragas, doenças e plantas daninhas (LUCCHESI, 1987; BATCHELOR et al., 2002). Desta forma, a

produtividade agrícola da cana-de-açúcar é dada pelo peso dos colmos em toneladas por área em hectare (Toneladas de Colmo por Hectare - TCH).

A cana-planta de ano e meio apresenta maior produtividade agrícola em relação à cana-planta de ano pelo fato de vegetar em um período mais longo (SEGATO et al., 2006a). A média histórica do TCH no Centro-Sul do Brasil é de: a) 83 t.ha<sup>-1</sup> para a cana-planta de ano; b) 112 t.ha<sup>-1</sup> para a cana-planta de ano e meio; c) 90 t.ha<sup>-1</sup> para o primeiro ciclo da cana-soca; d) 78 t.ha<sup>-1</sup> para o segundo ciclo; e) 71 t.ha<sup>-1</sup> para o terceiro ciclo e; f) 68 t.ha<sup>-1</sup> para o quarto ciclo e os demais ciclos (CTC, 2008).

A produtividade industrial é dada pela concentração de sacarose presente no colmo. Esta concentração determina a eficiência industrial na produção de açúcar ou álcool, dada em açúcar total recuperável (ATR) (SEGATO et al., 2006b).

A melhor condição meteorológica para o crescimento da cana-de-açúcar é a ocorrência de um período quente, úmido e com alta radiação solar na fase de crescimento vegetativo e um período seco, ensolarado e mais frio durante a fase de maturação (ALFONSI et al., 1987).

O fator climático que causa maior variabilidade na produtividade é a disponibilidade de água (ALFONSI et al., 1987). A necessidade de água da cultura varia de 1500 a 2500 mm, distribuídos com maior intensidade ao longo da fase de crescimento vegetativo (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Segato et al. (2006a) descreveram as exigências climáticas da cultura de cana-de-açúcar nas diferentes fases de crescimento e maturação:

- a) *Brotação das mudas*, temperatura alta (30°C) com boa umidade no solo para que o processo ocorra rapidamente;

b) *Perfilhamento*, alta radiação solar, temperatura entre 25 e 30°C, boa umidade e aeração no solo são favoráveis para o crescimento da cultura;

c) *Maturação*, beneficiada por condições desfavoráveis ao crescimento vegetativo, que estimulam o acúmulo de sacarose. Regiões com temperaturas média mensal do mês mais frio abaixo de 21 °C, com limitação de umidade no solo e ausência de vento são as condições mais favoráveis.

A produtividade agrícola é reduzida quando pelo menos um dos fatores acima mencionados não supre as necessidades da cultura. Um fato importante a ser considerado é que as plantas respondem de forma não linear à variação do ambiente em que se desenvolvem, principalmente no que se refere às variáveis precipitação e temperatura (HAMMER et al., 2002). Além disso, a resposta das plantas às variações ambientais depende do período em que elas ocorrem e da sua intensidade (BATCHELOR et al., 2002).

A cultura da cana-de-açúcar tem a capacidade de se adaptar aos diferentes tipos de textura do solo, desde a arenosa até a muito argilosa, inclusive em solos com alto teor de matéria orgânica (KOFFLER; DONZELI, 1987). Os solos com textura arenosa, porosos e mais secos favorecem a maturação. Aplicações exageradas de nitrogênio, bem como de vinhaça (resíduo da indústria canavieira) podem retardar a maturação (SEGATO et al., 2006a).

A produtividade agrícola também é afetada pelo fato das raízes da cana-soca se desenvolverem mais próximas à superfície a medida que os cortes anuais são realizados. Isso ocorre devido à brotação estar mais próxima à superfície e às condições adversas do solo (compactação), causadas principalmente pelo tráfego de veículos na lavoura (SEGATO et al., 2006a).

Além dos fatores mencionados acima, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode causar diminuição gradual da produtividade em

função da compactação do solo causada pela colheitadeira (PEREIRA; TORREZAN, 2006; SUGAWARA et al., 2007).

## **2.2 Índice de área foliar**

Uma característica do manejo de cultivo das *Saccharum* spp. para a produção comercial é o fato de não entrarem na fase reprodutiva; desta forma, a produtividade agrícola depende somente da fase de crescimento vegetativo (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Os aspectos fisiológicos da cana-de-açúcar necessários para o entendimento dos mecanismos de crescimento vegetativo e o acúmulo de sacarose são pouco conhecidos quando comparado às culturas que acumulam o produto comercial após passar para a fase reprodutiva, já que estas culturas apresentam estádios de crescimento e desenvolvimento mais previsíveis (INMAN-BAMBER et al., 2005; TEJERA, 2007). Contudo, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar está ligada ao aumento de biomassa, que é dependente do crescimento de sua área foliar (LUCCHESI, 1987). Oliveira et al. (2007) observaram que existe uma correlação linear positiva de aproximadamente 0,7 na relação entre o IAF e a produção de massa seca total.

Teruel et al. (1997) reportaram que o IAF da cana-de-açúcar varia de acordo com o estágio de corte da cultura, onde o valor máximo alcançado na cana-planta de ano e meio ficou entre 6 e 7, enquanto que no primeiro e no segundo ciclos da cana-soca o IAF máximo foi de 4 a 4,5. Na presença de deficiência hídrica leve, o IAF não diminui significativamente na cana-planta de ano e meio e nem na cana-soca. Porém, com alta deficiência hídrica o IAF da cana-planta de ano e meio é reduzido para valores em torno de 4 e o da cana-soca para 3. Já Oliveira et al. (2007) observaram valores de IAF entre 4,5 e 5,5 para a cana-planta sem irrigação com 320 a 380 dias após o plantio.

A redução do IAF observada da cana-planta para a cana-soca, que ocorre independentemente da condição climática, pode ser em função de menor perfilhamento, menor disponibilidade de nutrientes e maior compactação do

solo causada pelo tráfego de máquinas na lavoura (TERUEL et al., 1997; SEGATO et al., 2006a).

De acordo com Lucchesi (1987), o aumento da área foliar propicia um aumento na capacidade da planta de aproveitar a energia solar para a realização da fotossíntese. Contudo, isso ocorre até um certo limite, pois as folhas mais velhas tendem a morrer em função do sombreamento causado pelas folhas mais jovens (MONTEITH; UNSWORTH, 2007). Machado et al. (1985) relataram que uma lavoura de cana-de-açúcar com aproximadamente 13 meses e IAF igual a 3,7, absorve praticamente toda a radiação fotossinteticamente ativa incidente para ser utilizada nos processos fotossintéticos. O conhecimento da variação do IAF ao longo do ciclo da cultura tem grande importância como variável de entrada para os modelos agrônômicos (WIEGAND et al., 1986; GOEL, 1988; TERUEL et al., 1997; DORAISWAMY et al., 2004; ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008). Wiegand et al. (1986) sugeriram que o IAF pode retratar o efeito coletivo das condições do solo, da ocorrência de pragas e doenças, do déficit hídrico, entre outros, no crescimento de uma cultura agrícola. Contudo, os autores alertaram para o fato de que valores altos de IAF nem sempre se traduzem em alta produtividade agrícola.

### **2.3 Relação entre o índice de vegetação e o índice de área foliar**

Os IVs foram propostos para evidenciar algumas características biofísicas expressas nos dosséis das plantas e ao mesmo tempo reduzir a influência dos efeitos causados pela reflectância de fundo, geometria de visada e composição atmosférica, por ocasião da aquisição de dados por sensores remotos. O método mais utilizado para a geração de IVs é a combinação de um número limitado de bandas espectrais (DORIGO et al., 2007). Diversos IVs foram desenvolvidos para a avaliação qualitativa e quantitativa da vegetação (BANNARI et al., 1995). Dentre eles, o IV mais difundido e utilizado é o NDVI (SELLERS, 1989; COHEN et al., 2003).

De acordo com Dorigo et al. (2007), existem duas abordagens para relacionar os IVs com as variáveis biofísicas:

- a) *Abordagem estatística*, que busca uma relação consistente entre o IV e a variável biofísica de interesse por meio de medições realizadas a campo ou em laboratório;
- b) *Abordagem física*, que consiste na inversão de um modelo de reflectância do dossel para a estimativa das variáveis biofísicas.

A Tabela 2.1 mostra que as duas abordagens têm suas limitações, provenientes do fato da reflectância do dossel medida pelo sensor em diferentes bandas espectrais ser o resultado de uma complicada interação não linear entre o espalhamento e a absorção ocorridas no dossel, no solo e nos elementos da atmosfera (DORIGO et al., 2007).

A abordagem estatística parece ser a mais apropriada nos trabalhos em que o foco é o desenvolvimento de metodologias que estimam parâmetros biofísicos de forma simplificada.

No entanto, a escassez de trabalhos que descrevem a interação do dossel da cana-de-açúcar com a radiação incidente e refletida dificulta o entendimento da resposta espectral desta cultura agrícola e a sua relação com os parâmetros biofísicos (ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008).

Tabela 2.1 - Comparação entre as abordagens estatística e física

| <b>Abordagem estatística</b>                                                                   | <b>Abordagem física</b>                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Necessidade de muitas medidas em laboratório ou a campo para estabelecer a relação estatística | Medidas em laboratório ou a campo utilizadas somente na validação                                                                              |
| Dados espectrais geralmente são transformados em IVs                                           | Dados espectrais originais (bandas) são utilizados para a inversão do modelo                                                                   |
| As funções são baseadas em um número limitado de bandas                                        | A inversão geralmente é feita sobre todas as informações espectrais disponíveis                                                                |
| A função estatística é dada para uma variável por vez                                          | Vários parâmetros estimados ao mesmo tempo                                                                                                     |
| Não é possível incorporar informações de outras variáveis                                      | É possível incorporar informações prévias sobre a distribuição de diferentes variáveis                                                         |
| A demanda computacional não é grande                                                           | A demanda computacional é grande                                                                                                               |
| A influência atmosférica e a geometria de visada não são diretamente incorporadas ao método    | A influência atmosférica e a geometria de visada são diretamente incorporadas ao método                                                        |
| Baseado em medições no nadir                                                                   | Possibilidade de medições em vários ângulos                                                                                                    |
| O usuário não precisa ter um conhecimento profundo do assunto                                  | O usuário precisa ser capaz de escolher adequadamente o modelo de reflectância do dossel, a técnica de inversão e a distribuição das variáveis |

Fonte: Dorigo et al. (2007).

A relação entre o NDVI e o IAF da cana-de-açúcar foram descritos em alguns trabalhos, dentre eles destacam-se os trabalhos de Xavier e Vetorazzi (2004), El Hajj et al. (2007 e 2009) e Picoli et al. (2009).

Xavier e Vetorazzi (2004) avaliaram a relação do NDVI calculado a partir de dados de imagem do satélite Landsat, sensor ETM+, com medidas de IAF da cana-de-açúcar tomadas em campo. Os autores obtiveram coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,72 para esta relação.

El Hajj et al. (2007 e 2009) obtiveram uma relação exponencial entre o NDVI gerado a partir de dados do satélite SPOT e o IAF da cana-de-açúcar medido a campo com valores de  $r^2$  igual a 0,92.

Picoli et al. (2009) determinaram primeiramente a fração da cobertura do solo ( $F_c$ ) a partir do NDVI, com o uso do método proposto por Choudhury et al. (1994), ajustado para a cana-de-açúcar. Em seguida, o IAF é obtido pelo algoritmo recomendado por Rizzi e Rudorff (2007), onde o  $F_c$  é relacionado ao IAF.

De acordo com Gobron et al. (1997) e Casa e Jones (2005), apesar dos esforços para que um determinado IV não seja influenciado pelos efeitos da atmosfera, do ângulo de visada e do solo, as abordagens baseadas em relações empíricas entre o IV e o IAF são bem sucedidas apenas para valores de IAF menores do que 4.

## **2.4 Dados do sensor Modis**

Devido à alta dinâmica dos alvos agrícolas, uma das características mais importantes dos dados de SR para aplicações em agricultura é a resolução temporal, que possibilita o acompanhamento das culturas ao longo de seu ciclo. Outro aspecto importante relacionado à resolução temporal de sensores ópticos é o aumento da probabilidade de se obter imagens livre de nuvens quando se aumenta a frequência de observação da superfície terrestre pelo sensor. O sensor Modis, a bordo dos satélites Terra e Aqua, permite obter imagens quase diárias com resolução espacial de 250 m (RUDORFF et al., 2007). Embora a resolução espacial dos dados do sensor Modis seja moderada, estes dados parecem ser adequados para estudos regionais de monitoramento de grandes culturas agrícolas.

Guissard et al. (2004) e Duveiller e Defourny (2010) demonstraram que as amostras extraídas de observações multitemporais de pixels puros são capazes de representar as fases de crescimento de uma cultura agrícola dentro

de uma região homogênea com boa precisão. No entanto, Guissard et al. (2004) ressaltaram a importância do conhecimento sobre o tamanho, o formato e a distribuição dos talhões na região agrícola avaliada, de modo que a amostragem e a escolha da resolução espacial do dado de SR sejam feitas de forma adequada.

Além disso, os dados adquiridos pelo sensor Modis são disponibilizados gratuitamente na internet sob a forma de diferentes produtos, que permitem a sua utilização em trabalhos que requerem obtenção sistemática de dados de SR de alta qualidade. Estes produtos já possuem correção geométrica, radiométrica e atmosférica, permitindo a sua utilização imediata nas mais variadas aplicações (RUDORFF et al., 2007).

Mesmo assim, valores anômalos ainda são observados nas imagens Modis diárias ou em composições de 8 e 16 dias, decorrentes principalmente da presença de nuvens e do ângulo de visada do sensor (CARREIRAS et al., 2003).

Desta forma, sempre que possível, os valores anômalos, denominados de ruídos, devem ser removidos previamente ao uso dos produtos Modis. Diversos métodos de remoção de ruídos na série temporal de NDVI foram desenvolvidos, dentre os quais, Hird e McDermid (2009) avaliaram seis: a) dois métodos baseados em técnicas de ajuste de funções (assimétrica gaussiana e duplo logístico) e; b) quatro métodos de filtragem (Savitzky–Golay; “4253H, Twice”; valor médio e ARMD3-ARMA5). Estes métodos foram escolhidos em função da facilidade de execução e do bom desempenho demonstrado em aplicações não específicas. Na avaliação dos autores, os métodos com melhores desempenhos foram a assimétrica gaussiana e o duplo logístico. No entanto, na ausência de valores negativos representativos na série, o filtro “4253H, Twice” também tem bom desempenho.

A aplicação do filtro “4253H, Twice” é mais simples do que os dois métodos de melhor desempenho mencionados acima, o que torna este filtro um bom

candidato para aplicações operacionais. De acordo com Velleman (1980), o filtro “4253H, Twice” consiste na aplicação de medianas móveis com tamanhos de janela (quantidade de datas da série temporal) variável, seguido por um filtro de média ponderada, denominado de Hanning (H). Em seguida, parte do ruído é reintroduzido à série temporal. O uso inicial da mediana ao invés da média reduz a influência de um valor discrepante na série temporal no resultado da filtragem. Após o uso da mediana, a média pode ser aplicada sem que ocorra prejuízo para a suavização da série temporal.

## **2.5 Dados meteorológicos**

Um dos grandes problemas no uso de modelos agronômicos de forma espacializada é a falta de dados meteorológicos para grandes extensões territoriais. No Brasil, a quantidade de estações meteorológicas é pequena e insuficiente para fornecer dados com a resolução espacial necessária para trabalhos de caráter regional (RIZZI et al., 2006).

De acordo com McVicar e Jupp (1998) e Venäläinen (2002), o uso de dados provenientes de SR e de radares meteorológicos, em conjunto com dados de estações meteorológicas, é uma das alternativas à falta de dados. Os dados de modelos numéricos de previsão de tempo também podem ser considerados como uma fonte alternativa (VENÄLÄINEN, 2002; DE WIT, 2004).

No Brasil existe a possibilidade de utilizar dados meteorológicos provenientes da previsão realizada pelo modelo regional Eta do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este modelo fornece dados de previsão da radiação solar, precipitação pluviométrica, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar com resoluções espaciais horizontais de 20 x 20 km e 40 x 40 km (CHOU, 1996). Vieira Junior et al. (2009) relataram que é possível usar os dados Eta de 40x40 km para alimentar modelos de estimativa de produtividade agrícola, apesar de o modelo ter subestimado os valores da precipitação pluviométrica e da temperatura máxima e superestimar os valores da

temperatura mínima. Os autores sugerem que os erros sistemáticos das temperaturas mínimas e máximas sejam corrigidos antes da utilização destas variáveis.

Rizzi et al. (2006) utilizaram os dados do modelo regional Eta na estimativa da produtividade da cultura da soja com o uso do modelo agrônômico da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979) e obtiveram resultados satisfatórios.

O CPTEC-INPE também gera estimativas de precipitação usando o modelo Hidroestimador, que utiliza uma relação empírica exponencial entre a precipitação estimada por radar e a temperatura de brilho do topo das nuvens extraídas do canal infravermelho do satélite GOES-12 (SCOFIELD, 1987 e 2001; VICENTE et al., 2002).

Outra forma de se obter dados de precipitação é por meio de dados do satélite “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM), que foi projetado para realizar medições deste dado meteorológico nas regiões tropicais e subtropicais do planeta com o uso de sensores passivos associados ao sensor ativo “Precipitation Radar” (PR) (RASMUSSEN, 2006).

Adami et al. (2006) compararam a precipitação pluviométrica obtida pelo modelo regional Eta 40x40 km, Hidroestimador, TRMM e modelo de interpolação Média Ponderada por Cota e por Quadrante (MPCQ) com dados de estação meteorológica. Os autores observaram que as estimativas da precipitação acumulada para 15 dias foram melhores para o MPCQ, seguido pelo TRMM, modelo regional Eta e Hidroestimador.

A temperatura do ar pode ser relacionada à temperatura de superfície estimada com o uso de dados de SR da região do infravermelho termal (8 a 14  $\mu\text{m}$ ). Estas variáveis são duas grandezas físicas diferentes, mas que se relacionam pela troca de fluxo de energia próximo à superfície terrestre (DE WIT et al., 2004). Contudo, esta relação é complexa e depende de fatores

como umidade, radiação, densidade da vegetação e condições micrometeorológicas (MONTEITH; UNSWORTH, 2008).

## **2.6 Estimativa da produtividade agrícola**

### **2.6.1 Modelo agrônômico**

#### **2.6.1.1 Aspectos da utilização**

Um modelo agrônômico pode ser definido como a representação simplificada das complexas relações entre as condições climáticas e os fatores inerentes ao crescimento da cultura por meio de equações matemáticas e/ou técnicas estatísticas (BAIER, 1979).

A modelagem da produtividade agrícola, segundo Passioura (1996), apresenta dois desafios a serem enfrentados concomitantemente: a) o científico, com o objetivo de equacionar as relações do meio ambiente com a produtividade agrícola e; b) o de engenharia, em que os modelos podem ser utilizados no planejamento e no manejo de propriedades rurais, bem como para auxiliar no estabelecimento de políticas públicas do setor agrícola.

Os modelos agrônômicos são ferramentas que devem ser utilizados com cautela (MONTEITH, 1996) e não podem ser empregados como única ou principal ferramenta na estimativa de safras agrícolas (DONATELLI et al., 2002), já que a capacidade de estimar perdas na produtividade agrícola provocadas pela ação conjunta de diversos fatores incorporados nestes modelos é limitada (BATCHELOR et al., 2002).

A modelagem de todas as variáveis e suas interações com o meio ambiente é praticamente impossível (HOOGENBOOM, 2000). Segundo Monteith (2000), modelos detalhados necessitam da combinação de muitos algoritmos para a explicação dos processos fisiológicos e dos impactos dos fatores ambientais sobre estes processos. O autor explica que, em geral, os modelos são parametrizados com dados provenientes de diferentes fontes. Contudo, este

procedimento ocasiona duas limitações: a) informações de diferentes fontes geralmente não são compatíveis entre si e estas incompatibilidades não são detectadas com facilidade, causando impacto na saída do modelo difícil de ser quantificado e; b) os parâmetros de entrada não são desprovidos de erros, como se costuma assumir (MONTEITH, 2000). Desta forma, muitos pressupostos podem estar embutidos no modelo, principalmente quando as informações que descrevem as interações no sistema são inadequadas ou não existem (HOOGENBOOM, 2000).

Os modelos agronômicos devem ser simples, com a menor quantidade de dados de entrada possível (Passioura, 1986), sem contudo, comprometer a capacidade do modelo em descrever as relações entre o solo, a vegetação e o ambiente na expressão da produtividade agrícola. Na literatura existe a descrição de diversos modelos de estimativa de produtividade agrícola. Entre estes, o modelo agronômico desenvolvido pela FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979) tem mostrado simplicidade e potencial de uso para estimar a produtividade agrícola (RUDORFF; BATISTA, 1990; BERKA et al., 2003; ASSAD et al., 2007; RIZZI; RUDORFF, 2007).

A produtividade agrícola estimada pelo modelo agronômico da FAO tem por base a seguinte equação (DOORENBOS; KASSAM, 1979):

$$\left(1 - \frac{PR}{PM}\right) = ky \left(1 - \frac{ETr}{ETm}\right) \quad (2.1)$$

em que PR é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ), PM é a produtividade agrícola máxima na ausência de deficiência hídrica ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ), ky é o fator de resposta à produtividade, ETr é a evapotranspiração real (mm) e ETm é a evapotranspiração máxima (mm).

O modelo da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979) pode ser executado em intervalos regulares de tempo (diário, semanal, decendial, quinzenal ou mensal) ao longo do ciclo de uma cultura agrícola. A soma dos valores de PR

estimados em cada intervalo de tempo resulta na produtividade agrícola do ano safra em avaliação. Além da produtividade, o modelo pode fornecer um índice de penalização, que representa a fração da produtividade agrícola que está sendo perdida em função de limitações do crescimento da cultura em um determinado ano safra (RIZZI et al., 2006).

#### **2.6.1.2 Aspectos da espacialização**

Os diferentes aspectos da espacialização de modelos agronômicos foram amplamente explorados por Hartkamp et al. (1999) e Faivre et al. (2004).

As estratégias de espacialização podem ser consideradas como uma questão computacional. No entanto, existem outras questões que afetam a espacialização, tais como: a) resoluções espacial e temporal; b) tipo (linear ou não linear); c) a complexidade dos processos modelados e a fonte de dados; d) o formato e a estrutura dos dados disponíveis e; e) as relações dinâmicas entre o modelo e as unidades espaciais (talhão, propriedade, município, estado, entre outros) (HARTKAMP et al., 1999; HANSEN; JONES, 2000).

Segundo Faivre et al. (2004), muitas vezes a espacialização de modelos agronômicos requer a mudança de escala dos dados de entrada e do modelo, de uma escala local para uma escala global e vice-versa. Os autores comentaram que, em geral, as escalas de entrada dos dados e de saída dos resultados são alteradas, enquanto que a escala do modelo se mantém inalterada. Ou seja, os conceitos básicos, as hipóteses e as validações são provenientes de modelos pontuais e a alteração de escala deve envolver também o transporte destes conhecimentos, que podem ter respostas diferentes em escalas distintas (ANDERSON et al., 2003; FAIVRE et al., 2004).

Na modelagem da produtividade agrícola, podem ser distinguidos dois tipos de dados de entrada (FAIVRE et al., 2004): a) ambientais, tais como dados meteorológicos, IAF, mapas de solos e de distribuição da cultura e; b) práticas de manejo, tais como a variedade da cultura, data de plantio e densidade

populacional, irrigação, adubação, entre outros. Estes dados são difíceis de serem obtidos para grandes áreas e sua espacialização é feita raramente. No caso da cana-de-açúcar, o conhecimento do estágio de corte da cultura é importante para a determinação da produtividade agrícola.

Informações sobre o estágio de corte das áreas de cultivo de cana-de-açúcar podem ser obtidos nos mapas gerados pelo projeto Canasat, realizado pelo INPE em cooperação com a União da Indústria de Cana-de-açúcar (Unica), Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq)/Universidade de São Paulo (USP) e pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (RUDORFF; SUGAWARA, 2007; INPE, 2010; RUDORFF et al., 2010).

O desempenho de um modelo de estimativa de produtividade agrícola depende não só da capacidade do modelo de simular as condições de crescimento das culturas, mas também da qualidade dos dados de entrada, da escolha da unidade espacial e da calibração do modelo (FAIVRE et al., 2004).

### **2.6.2 No Brasil**

A produtividade de uma cultura agrícola é estimada por meio de levantamentos subjetivos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão oficialmente designado para tal função (PINO, 2001).

Informações relacionadas à cultura de cana-de-açúcar também são geradas pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA) (somente em São Paulo), pela Unica e pelo CTC. Estas informações também podem ser obtidas na “Food and Agriculture Organization” (FAO), que divulga as informações fornecidas pelo IBGE.

A produtividade agrícola estimada pelas entidades citadas acima é composta por informações sobre a venda de insumos, tendências de mercado, inovações tecnológicas, questionários aplicados nas usinas, entre outras.

Na usina, a estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar também é feita de forma subjetiva, onde os técnicos percorrem as lavouras antes do início da colheita e atribuem um valor de produtividade do talhão com base na experiência adquirida ao longo do tempo e nas informações dos anos safra anteriores (PICOLI et al., 2009).

Contudo, divergências são observadas nos dados de produtividade agrícola divulgados pelas diferentes entidades, conforme pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Dados de produtividade agrícola da cana-de-açúcar do estado de São Paulo divulgados por diversas entidades para os anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

| Entidade             | Ano safra           |         |         | Fonte                                                                |
|----------------------|---------------------|---------|---------|----------------------------------------------------------------------|
|                      | 2006/07             | 2007/08 | 2008/09 |                                                                      |
| FAO                  | dados indisponíveis |         |         | www.fao.org                                                          |
| Conab                | 86,6                | 86,7    | 89,0    | www.conab.gov.br                                                     |
| IBGE                 | 82,6                | 82,8    | 84,6    | www.ibge.gov.br                                                      |
| IEA                  | 81,7                | 82,9    | 83,9    | www.iea.sp.gov.br                                                    |
| Unica/Canasat*       | 81,1                | 78,2    | 86,2    | www.unica.com.br<br>www.dsr.inpe.br/canasat/<br>Aguiar et al. (2010) |
| CTC                  | 86,8                | 84,9    | 90,8    | comunicação pessoal                                                  |
| Usina São Martinho** | 89,9                | 86,3    | 86,6    | comunicação pessoal                                                  |

\* Calculado com base na produção divulgada pela Unica e na área colhida divulgada pelo projeto Canasat, com a subtração da área de cana-bisada divulgada por Aguiar et al. (2010).

\*\* Somente para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar da usina.

As informações contidas na Tabela 2.3 mostram que, além das divergências numéricas, existe uma diferença quanto ao ano safra considerado por cada entidade na divulgação das estatísticas agrícolas.

Tanto a divergência dos valores da produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Tabela 2.2) quanto a diversidade de nomenclaturas dos anos safra associados (Tabela 2.3), geram confusões e incertezas no uso destes dados para a validação de modelos agronômicos. Conforme abordado no item 2.6,

os modelos também possuem incertezas e precisam ser aprimorados (ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008).

Tabela 2.3 - Anos safra considerados pelas entidades que fornecem dados de produtividade agrícola da cana-de-açúcar e os anos safra correspondentes aos utilizados neste trabalho.

| Entidade           | Ano safra |         |         | Fonte                                                                |
|--------------------|-----------|---------|---------|----------------------------------------------------------------------|
|                    | 2006/07   | 2007/08 | 2008/09 |                                                                      |
| FAO                | 2005      | 2006    | 2007    | www.fao.org                                                          |
| Conab              | 2006/07   | 2007/08 | 2008/09 | www.conab.gov.br                                                     |
| IBGE               | 2005      | 2006    | 2007    | www.ibge.gov.br                                                      |
| IEA                | 2005      | 2006    | 2007    | www.iea.sp.gov.br                                                    |
| Unica/Canasat      | 2006/07   | 2007/08 | 2008/09 | www.unica.com.br<br>www.dsr.inpe.br/canasat/<br>Aguiar et al. (2010) |
| CTC                | 2006/07   | 2007/08 | 2008/09 | comunicação pessoal                                                  |
| Usina São Martinho | 2006/07   | 2007/08 | 2008/09 | comunicação pessoal                                                  |

Contudo, a dificuldade de validação e as limitações dos modelos sugerem que uma nova abordagem deve ser adotada nos estudos relacionados à estimativa da produtividade agrícola.

A abordagem sugerida no presente trabalho propõe a estimativa de indicadores que mostrem a tendência de decréscimo ou acréscimo da produtividade agrícola em relação ao(s) ano(s) safra(s) anterior(es), com base na variação do índice de área foliar e dos dados de precipitação pluviométrica, radiação solar, temperatura do ar, vento e umidade relativa, integrados em um SIG por meio de um modelo agronômico.

Desta forma, os especialistas que compõe os valores das estimativas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar terão disponível uma ferramenta de análise que fornece indicadores especializados do efeito de variáveis meteorológicas e de SR sobre esta produtividade.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, localizado entre as latitudes sul 19°46' e 25°19' e as longitudes 44°09' e 53°07', a oeste de Greenwich (Figura 3.1), no período compreendido entre os anos safra 2006/07 e 2008/09.

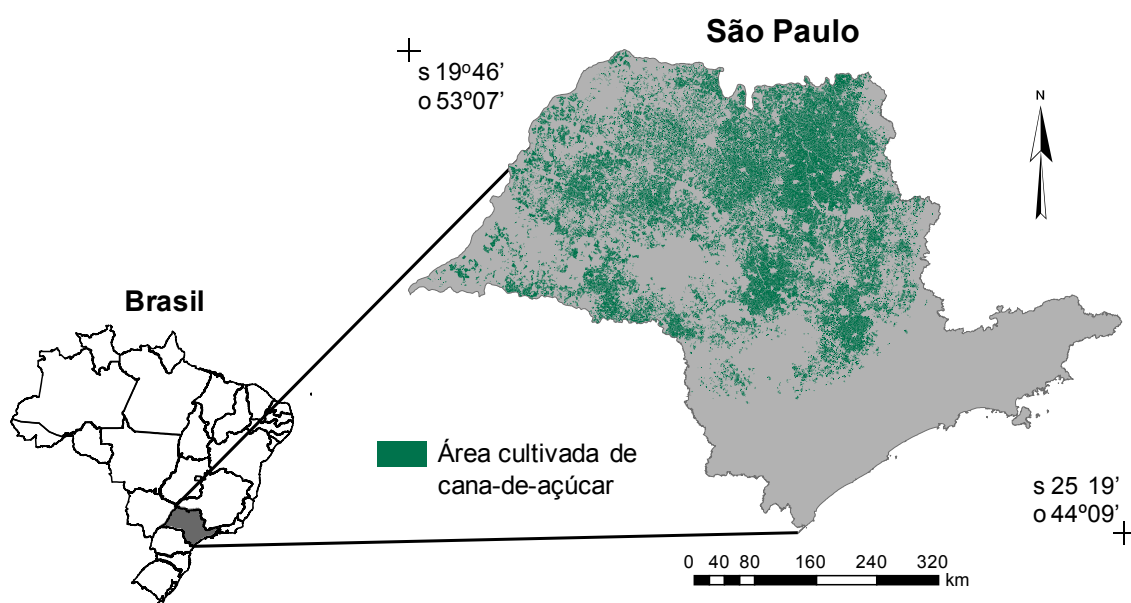


Figura 3.1 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no ano safra 2008/09.

Fonte: Canasat (INPE, 2010).

O estado possui sete tipos climáticos distintos, de acordo com a classificação climática de Köppen. Nas áreas de cultivo da cana-de-açúcar os tipos climáticos predominantes são Aw e Cwa. O tipo climático Aw é descrito como tropical chuvoso com inverno seco, onde no mês mais frio a temperatura média é superior a 18°C e a precipitação é inferior a 60 mm no mês mais seco. O tipo climático Cwa é caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente

superior a 22°C (Cepagri, 2010). Estes tipos climáticos estão de acordo com as exigências climáticas da cultura de cana-de-açúcar (SEGATO et al., 2006a).

Os solos da área de estudo pertencem predominantemente à classe dos latossolos e dos argissolos. Os latossolos são encontrados nas regiões norte, leste e central do estado. Nestas regiões também ocorrem algumas manchas de neossolos. Os argissolos, latossolos e cambissolos predominam na região sul. Os argissolos também são encontrados em abundância no oeste do estado, onde também existe uma grande mancha de latossolos (OLIVEIRA et al., 1999). Estes tipos de solos são adequados ao plantio da cana-de-açúcar em função da capacidade da cultura para se adaptar em diferentes tipos de textura de solos (KOFFLER; DONZELI, 1987).

As altitudes nas regiões produtoras de cana-de-açúcar variam entre 200 e 800 m, de acordo com os dados obtidos pela missão “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) (RABUS, 2003), no endereço <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>.

Em relação à distribuição do cultivo de cana-de-açúcar, das 15 regiões administrativas (RA) do estado, 11 cultivaram cana-de-açúcar destinada à agroindústria do açúcar e do álcool no ano safra 2008/09, de acordo com os dados do projeto Canasat (INPE, 2010). Nestas RA a cultura ocupou um total de 4,4 milhões de hectares, o que correspondeu a cerca de 68% da área de cana-de-açúcar do Centro-Sul do Brasil. As expansões ocorridas nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09 tiveram destaque por aumentar as áreas de cultivo de cana-de-açúcar em 306 mil, 637 mil e 662 mil ha, respectivamente (INPE, 2010).

O projeto Canasat teve início no ano safra 2003/04 e gera mapas temáticos das áreas de cultivo de cana-de-açúcar a partir da interpretação visual de imagens multitemporais, principalmente do satélite Landsat (RUDORFF et al., 2005; RUDORFF; SUGAWARA, 2007;

RUDORFF et al., 2010). Os mapas estão disponíveis na internet para visualização e consulta no seguinte endereço: <http://www.dsr.inpe.br/canasat/>.

Nos anos safra avaliados neste estudo, foram definidas as seguintes classes de cana-de-açúcar: a) *Socas*; b) *Planta* proveniente de áreas de reforma com cana-planta de ano e meio; c) *Planta* proveniente de áreas de expansão e; d) *Em reforma* para plantio de cana de ano e meio (RUDORFF; SUGAWARA, 2007).

Os mapas temáticos anuais resultantes da interpretação das áreas de cultivo de cana-de-açúcar realizada para o município de Cosmópolis-SP, nos anos safra 2003/04 a 2008/09, podem ser observados na Figura 3.2.

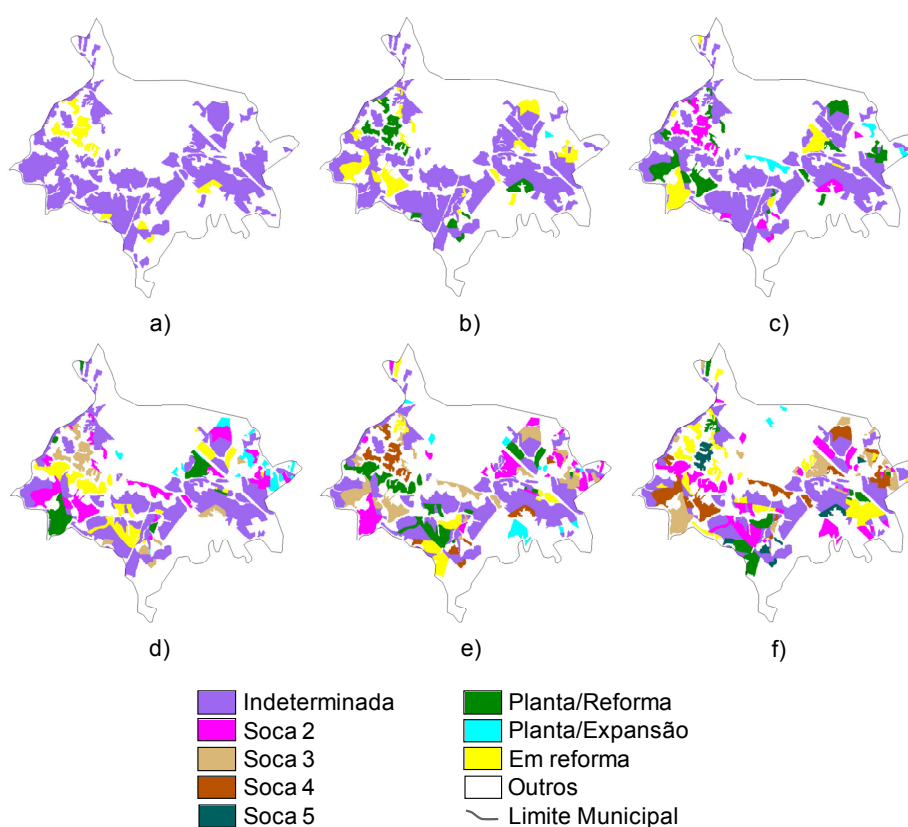


Figura 3.2 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no município de Cosmópolis - SP, nos anos safra: a) 2003/04; b) 2004/05; c) 2005/06; d) 2006/07; e) 2007/08 e; f) 2008/09.  
Fonte: Canasat (INPE, 2010).

No primeiro ano safra de mapeamento foram delimitadas as áreas de cana-planta e de cana-soca (Figura 3.2a). No entanto, não foi possível determinar o estágio de corte das áreas de cana-soca. Desta forma, estas áreas foram classificadas como *Indeterminada*. Áreas de cana *Em reforma* para plantio de cana de ano e meio (Figura 3.2a) também puderam ser mapeadas neste ano safra, pois estas áreas haviam sido previamente identificadas como áreas de cultivo de cana-de-açúcar com o uso de imagens referentes ao ano safra 2002/03 (RUDORFF et al., 2005). Nos anos safra seguintes os mapas foram atualizados sempre com base no mapa do ano safra anterior, o que possibilitou o acompanhamento da evolução dos estágios de corte da cana-de-açúcar. Por exemplo, uma área *Em reforma* com cana-planta de ano e meio no ano safra 2003/04 (Figura 3.2a) passou automaticamente a ser uma área de: a) *Planta/Reforma* no ano safra 2004/05 (Figura 3.2b); b) *Soca 2* em 2005/06 (Figura 3.2c); c) *Soca 3* em 2006/07 (Figura 3.2d); d) *Soca 4* em 2007/08 (Figura 3.2e) e; e) *Soca 5* em 2008/09 (Figura 3.2f); (RUDORFF; SUGAWARA, 2007). O estágio de corte não pode ser identificado pelas imagens de satélite nas áreas de cana reformada com cana-planta de ano, de tal forma que estas áreas foram classificadas como *Indeterminada*.

### **3.2 Dados de sensoriamento remoto e índice de área foliar**

Dentre os produtos Modis disponíveis, foi selecionado o produto MOD13Q1, proveniente das imagens obtidas pelo satélite Terra, que fornece índices de vegetação em composições temporais de 16 dias, com resolução espacial de 250 m. Este produto encontra-se na versão 005 e a validação no estágio 2, o que permite o seu uso para fins científicos, de acordo com NASA (2010). As composições temporais foram obtidas no endereço <https://wist.echo.nasa.gov/api/>, de onde os dados de NDVI foram extraídos com o uso do aplicativo “Modis Reprojection Tool”, fornecido no endereço [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis\\_reprojection\\_tool](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool).

O filtro “4253H, Twice” (VELLEMAN, 1980) foi aplicado na série temporal de NDVI para minimizar os ruídos presentes. A aplicação do filtro foi feita em quatro etapas (Figura 3.3): i) Na Etapa 1, a mediana foi calculada em uma janela móvel para os valores de NDVI correspondentes a quatro datas da série temporal. O resultado foi submetido novamente ao cálculo da mediana, mas com o uso de uma janela móvel de duas datas da série temporal. O mesmo procedimento foi realizado para o cômputo das medianas com janelas móveis de cinco e três datas da série temporal. Em seguida, o método denominado de Hanning (H) foi utilizado nos valores resultantes do cômputo das medianas. Este método consiste na aplicação de uma média móvel ponderada, em uma janela composta por três datas da série temporal, com pesos  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{1}{4}$ ; ii) Na Etapa 2 foi feita a subtração entre os dados originais e o resultado da filtragem destes dados originais, que representou o resíduo ou o ruído da série temporal; iii) Na Etapa 3, o resíduo foi filtrado da mesma forma que o dado original na Etapa 1; iv) Na Etapa 4, o resultado da Etapa 3 foi agregado ao resultado da Etapa 1.



Figura 3.3 - Diagrama esquemático de funcionamento do filtro “4253H, Twice”.

As séries filtradas das composições temporais de NDVI foram utilizadas para o cálculo do IAF. A seleção da função mais adequada para o cálculo do IAF, com

base nas séries temporais filtradas de NDVI, foi feita através da avaliação de três métodos.

No primeiro método avaliado, denominado de Método 1, o cálculo do IAF foi feito em duas etapas. A primeira etapa consistiu na determinação do valor de Fc (CHOUDHURY et al. 1994):

$$Fc = 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{1,1}, \quad (3.1)$$

em que Fc é a fração do solo coberto pela cultura, NDVI<sub>max</sub> é o valor máximo do NDVI da imagem, NDVI<sub>min</sub> é o valor mínimo do NDVI da imagem e NDVI é o valor do NDVI de cada pixel da imagem.

Em seguida, o IAF foi estimado da seguinte forma (RIZZI; RUDORFF, 2007):

$$IAF = -2\ln(1 - Fc), \quad (3.2)$$

em que IAF é o índice de área foliar e, Fc é a fração do solo coberto pela cultura, calculado pela Equação 3.1.

O segundo método verificado foi a equação ajustada por Xavier e Vetorazzi (2004), dado por:

$$IAF = 1,4560 \cdot NDVI^{5,5249}, \quad (3.3)$$

O último método de cálculo do IAF avaliado foi a equação ajustada por El Hajj et al. (2007), em que:

$$IAF = 0,003 \cdot e^{9,713 \cdot NDVI}, \quad (3.4)$$

### 3.3 Dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho foram: a) precipitação pluviométrica (mm.dia<sup>-1</sup>); b) temperaturas

mínima, média e máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ); c) densidade de fluxo de radiação solar global incidente ( $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ); d) velocidade do vento a 2 metros de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e; e) umidade relativa do ar (%).

Na obtenção destas variáveis foram utilizados os resultados da previsão de 24 horas do modelo regional Eta do CPTEC, com condição inicial às 0000 do Tempo Universal Coordenado (UTC) e resolução espacial horizontal de  $20 \times 20$  km. Estes dados foram disponibilizados em quatro horários diários (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC).

Eventuais falhas nos dados foram corrigidas da seguinte forma: a) precipitação pluviométrica, pelo cálculo da média entre o horário anterior e posterior ou quando estes dados também não estavam disponíveis, pela média entre os dados do dia anterior e do dia posterior, nos mesmos horários da falha e; b) demais variáveis, pelo cálculo do valor médio entre os dados do dia anterior e do dia posterior, nos mesmos horários da falha.

Os procedimentos para a adequação dos dados do modelo regional Eta ao formato dos dados de entrada do modelo agrônomo foram feitos com base na metodologia descrita em Rizzi et al. (2006).

Na primeira etapa, os quatro dados diários de cada variável meteorológica foram adequados para representar um único dado diário. Neste procedimento, a composição do dia foi iniciada no horário 0600 UTC e finalizada no horário 0000 UTC. Estes horários foram escolhidos em função do fuso horário da área de estudo ter defasagem de -3 horas em relação à hora UTC (sem considerar o horário de verão).

A precipitação pluviométrica diária foi obtida da seguinte forma (VIEIRA JUNIOR et al., 2009):

$$Pe_{\text{diária}} = Pe_{06} + Pe_{12} + Pe_{18} + Pe_{00}, \quad (3.5)$$

em que  $Pe_{diária}$  é a precipitação pluviométrica acumulada em um dia ( $mm.dia^{-1}$ ),  $Pe_{06}$  é a precipitação acumulada (mm) entre 0000 e 0600 UTC,  $Pe_{12}$  é a precipitação acumulada (mm) entre 0600 e 1200 UTC,  $Pe_{18}$  é a precipitação acumulada (mm) entre 1200 e 1800 UTC e,  $Pe_{00}$  é a precipitação acumulada (mm) entre 1800 e 0000 UTC.

A temperatura média diária foi obtida pelo cálculo da média entre a temperatura mínima e a temperatura máxima (ALLEN et al., 1998), de acordo com a seguinte equação:

$$T_{med_{diária}} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2}, \quad (3.6)$$

em que  $T_{med_{diária}}$  é a temperatura média do ar diária ( $^{\circ}C$ ),  $T_{min}$  é a temperatura mínima do ar, dada pela temperatura do horário 0600 UTC ( $^{\circ}C$ ) e,  $T_{max}$  é a temperatura máxima do ar, representada pela temperatura ( $^{\circ}C$ ) do horário 1800 UTC.

A radiação solar incidente média diária foi obtida com o cálculo da média da radiação solar incidente estimada nos horários 1200, 1800 e 0000 UTC, com base na seguinte equação:

$$Roc_{diária} = \frac{Roc_{12} + Roc_{18} + Roc_{00}}{3} \cdot 2,06, \quad (3.7)$$

na qual  $Roc_{diária}$  é a radiação solar incidente média diária ( $cal.cm^{-2}.dia^{-1}$ ),  $Roc_{12}$  é a radiação solar incidente no horário 1200 UTC ( $w.m^{-2}$ ),  $Roc_{18}$  é a radiação solar incidente às 1800 UTC ( $w.m^{-2}$ ),  $Roc_{00}$  é a radiação solar incidente no horário 0000 UTC ( $w.m^{-2}$ ) e, 2,06 é o fator de conversão dos dados em  $w.m^{-2}$  para  $cal.cm^{-2}.dia^{-1}$  (ALLEN et al., 1998).

A velocidade média do vento diária a 2 m de altura ( $m.s^{-1}$ ) foi calculada da seguinte forma:

$$V_{\text{diária}} = \frac{V_{06} + V_{12} + V_{18} + V_{00}}{4} \cdot 0,748, \quad (3.8)$$

em que  $V_{\text{diária}}$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $V_{06}$  é a velocidade do vento a 10 m ( $\text{m.s}^{-1}$ ) no horário 0600 UTC,  $V_{12}$  é a velocidade do vento a 10 m ( $\text{m.s}^{-1}$ ) no horário 1200 UTC,  $V_{18}$  é a velocidade do vento a 10 m ( $\text{m.s}^{-1}$ ) às 1800 UTC,  $V_{00}$  é a velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) a 10 m no horário 0000 UTC e, 0,748 é o fator de conversão da velocidade do vento a 10 m para 2 m de altura (ALLEN et al., 1998).

A umidade relativa do ar média diária (%) foi calculada por meio da seguinte equação:

$$UR_{\text{diária}} = \frac{UR_{06} + UR_{12} + UR_{18} + UR_{00}}{4}, \quad (3.9)$$

em que  $UR_{\text{diária}}$  é a umidade relativa do ar média diária (%),  $UR_{06}$  é a umidade relativa do ar às 0600 UTC,  $UR_{12}$  é a umidade relativa do ar no horário 1200 UTC,  $UR_{18}$  é a umidade relativa do ar às 1800 UTC,  $UR_{00}$  é a umidade relativa do ar no horário 0000 UTC.

Com a finalidade de compatibilizar os dados meteorológicos com os dados de SR, foi adotado o passo de cálculo de 16 dias, com as datas coincidentes com as composições temporais do produto MOD13Q1. Neste período de 16 dias, a precipitação pluviométrica foi somada e médias foram calculadas para as demais variáveis meteorológicas, com base nos dados diários. Em seguida, estes dados foram espacializados no formato de grades regulares de 20 km de resolução espacial.

### 3.4 Outros dados

Além dos dados espectrais, meteorológicos e de localização das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, foram obtidos mapas de altimetria, da classificação dos solos e da divisão política do estado de São Paulo.

O mapa de altimetria na resolução espacial de 90 m, provenientes da missão SRTM, versão 2.1, foram obtidos no seguinte endereço: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>.

O mapa da classificação de solos na escala 1:500.000 foi obtido em Oliveira et al. (1999). A capacidade de água disponível (CAD) do solo foi derivada do mapa de solos, com base no trabalho de Farias et al. (2000). Esta variável é um dado de entrada para o cálculo do balanço hídrico no modelo agrônômico.

Além disso, o mapa com as divisões das RA foi gerado com base no mapa da divisão política municipal do estado de São Paulo na escala 1:500.000, que foi obtida junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística no endereço: [ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapas/malhas\\_digitaais/municipio\\_2005/E500](ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitaais/municipio_2005/E500).

### **3.5 Amostragem e período de avaliação**

O estabelecimento dos estratos e das amostras foi feito com o auxílio dos mapas gerados pelo projeto Canasat nos anos safra 2003/04 a 2008/09 (INPE, 2010). Com base no mapa do ano safra 2008/09, foi feita uma sobreposição de modo que apenas as áreas coerentes e coincidentes nos seis mapas fossem consideradas. Por exemplo, uma área de *Planta/Expansão* em 2008/09 não poderia apresentar cultivo de cana-de-açúcar nas safras anteriores. Já uma área proveniente de área reformada no estágio de corte *Soca 5* em 2008/09 teria que ser área de *Soca 4* em 2007/08, e assim por diante até o ano safra 2004/05, onde deveria ser *Planta* e área *Em reforma* no ano safra 2003/04 (Figura 3.2). As áreas *Em reforma* no ano safra 2008/09 não foram consideradas neste trabalho, já que não havia cana-de-açúcar disponível para colheita nestas áreas. As demais considerações (apenas nos anos safra avaliados) podem ser vistas na Tabela 3.1. Desta forma, o mapa do ano safra 2008/09 resultante foi tomado como base para a realização da amostragem e a definição dos estratos (Tabela 3.1). É preciso salientar que os estratos 21, 22, 31 e 32 somente foram considerados neste trabalho a partir do ano safra em

que a cana-planta estivesse disponível para colheita. Desta forma, os estratos 21 e 31 foram avaliados somente no ano safra 2008/09 e os estratos 22 e 32, nos anos safra 2007/08 e 2008/09 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Estratos e estágios de corte das áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

| Estrato       | Código | Ano safra     |               |               |
|---------------|--------|---------------|---------------|---------------|
|               |        | 2006/07       | 2007/08       | 2008/09       |
| Indeterminado | 11     | Indeterminado | Indeterminado | Indeterminado |
| Reforma 2007  | 21     | Indeterminado | Em reforma    | Planta        |
| Reforma 2006  | 22     | Em reforma    | Planta        | Soca 2        |
| Reforma 2005  | 23     | Planta        | Soca 2        | Soca 3        |
| Reforma 2004  | 24     | Soca 2        | Soca 3        | Soca 4        |
| Reforma 2003  | 25     | Soca 3        | Soca 4        | Soca 5        |
| Expansão 2007 | 31     | Outro uso     | Outro uso     | Planta        |
| Expansão 2006 | 32     | Outro uso     | Planta        | Soca 2        |
| Expansão 2005 | 33     | Planta        | Soca 2        | Soca 3        |
| Expansão 2004 | 34     | Soca 2        | Soca 3        | Soca 4        |
| Expansão 2003 | 35     | Soca 3        | Soca 4        | Soca 5        |

Em seguida, com base na resolução espacial das imagens Modis, uma grade amostral de 250x250 m foi criada para ser sobreposta ao mapa gerado na etapa anterior. Neste cruzamento apenas polígonos da grade amostral cuja área estivesse coberta 100% com área de cultivo de cana-de-açúcar foram selecionados.

As unidades amostrais de 250x250 m foram transformadas em pontos, localizados nos centróides de cada polígono, com o intuito de facilitar a extração dos dados de entrada do modelo agrônômico apresentados nos tópicos 3.2, 3.3 e 3.4. A armazenagem dos dados extraídos, bem como dos resultados gerados nas unidades amostrais foi feita no formato tabular.

Os dados foram extraídos no período de setembro de 2005 a maio de 2008. Dentro de cada ano safra foram escolhidos 12 períodos de 16 dias, coincidentes com a data das composições temporais dos dados Modis e com o período de início de crescimento vegetativo até o máximo crescimento vegetativo da cana-de-açúcar para a formação da biomassa, de acordo com Casagrande (1991). A Tabela 3.2 mostra os 12 períodos de avaliação selecionados e as datas correspondentes a cada período. Os períodos escolhidos foram comparados com a evolução temporal do NDVI.

Tabela 3.2 - Período de avaliação selecionado e as respectivas datas dos períodos das composições de 16 dias das imagens Modis.

| Período | Data          |
|---------|---------------|
| 1       | 30/09 a 15/10 |
| 2       | 16/10 a 31/10 |
| 3       | 01/11 a 16/11 |
| 4       | 17/11 a 02/12 |
| 5       | 03/12 a 18/12 |
| 6       | 19/12 a 03/01 |
| 7       | 01/01 a 16/01 |
| 8       | 17/01 a 01/02 |
| 9       | 02/02 a 17/02 |
| 10      | 18/02 a 05/03 |
| 11      | 06/03 a 21/03 |
| 12      | 22/03 a 06/04 |

Além disso, foi feito um somatório dos valores de NDVI no período avaliado para cada ano safra, de acordo com a seguinte equação:

$$NDVI_{\text{acumulado}} = \sum_{1}^n NDVI, \quad (3.10)$$

em que  $NDVI_{acumulado}$  é o somatório do valor de NDVI nos 12 períodos avaliados (Tabela 3.2), NDVI é o valor de NDVI no período n e, n é o número de períodos por ano safra.

Após o cálculo do  $NDVI_{acumulado}$  foram determinados: a) o valor mínimo; b) o 1º quartil; c) a mediana; d) o 3º quartil e; e) o valor máximo para cada estrato nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09, representados na forma de “notched box plot”. Em seguida, foi feita uma comparação entre as medianas dos diversos grupos, onde o entalhe em torno da mediana fornece os valores de significância das diferenças entre os valores de medianas de dois ou mais grupos. Desta forma, se não há sobreposição entre os entalhes dos diferentes grupos, as medianas são diferentes ao nível de 5% de significância (MCGILL et al., 1978).

Os dados pertencentes aos tópicos 3.2, 3.3 e 3.4, devidamente georeferenciados, foram utilizados em sua resolução espacial original, ou seja, nenhuma reamostragem foi feita (Figura 3.4).

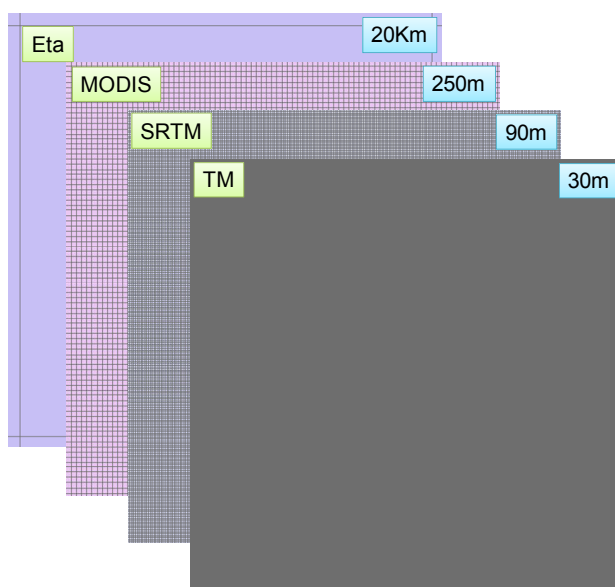


Figura 3.4 - Resolução espacial das variáveis de entrada do modelo agrônomo.

### **3.6 Avaliação dos dados estimados pelo modelo regional Eta**

Os valores de precipitação pluviométrica acumulada, temperatura mínima média e temperatura máxima média, estimados pelo modelo regional Eta foram comparados nos períodos descritos na Tabela 3.2, com os observados em 98 estações meteorológicas no estado de São Paulo, obtidos no Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), no endereço <http://www.ciiagro.sp.gov.br/> (Tabela A.1). Para que as informações observadas e estimadas fossem comparáveis, os dados de estações do CIIAGRO foram agregados a cada 16 dias, de acordo com os períodos apresentados na Tabela 3.2, onde a precipitação pluviométrica foi somada e médias foram calculadas para as temperaturas mínima e máxima.

Esta comparação foi feita por meio de análise de regressão, onde o coeficiente de correlação ( $r$ ), o coeficiente linear ( $a$ ), o coeficiente angular ( $b$ ), o erro médio quadrático (EMQ) e o erro médio absoluto (EMA) foram estimados em 1000 amostras geradas pela técnica de “Bootstrap” (EFRON; TIBSHIRANI, 1986), com intervalo de confiança de 99%. Willmott et al. (2009) recomendam o uso do EMA devido ao fato do EMQ ser uma medida tendenciosa.

A evolução dos valores médios, observados pelo CIIAGRO e estimados pelo modelo regional Eta, das variáveis precipitação pluviométrica, temperatura mínima e temperatura máxima foram apresentados na forma de gráficos de linha e de barra. Além disso, as precipitações pluviométricas médias de cada período avaliado, observadas pelo CIIAGRO e estimadas pelo modelo Eta, foram acumuladas, de modo que o último período representasse a precipitação pluviométrica total ocorrida durante os 12 períodos avaliados em cada ano safra (Tabela 3.2). Estes dados foram apresentados no formato de gráfico de linha.

### 3.7 Variação interanual da produtividade agrícola

#### 3.7.1 Modelo agrônômico

O modelo agrônômico de estimativa de produtividade agrícola da FAO foi adaptado para atender aos objetivos deste trabalho, dado por (DOORENBOS; KASSAM, 1979):

$$PR = PM \left[ 1 - k_y \left( 1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) \right], \quad (3.11)$$

em que, PR é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos (TCH), PM é a produtividade agrícola máxima na ausência de deficiência hídrica (TCH),  $k_y$  é o fator de resposta à produtividade,  $ET_r$  é a evapotranspiração real (mm) e  $ET_m$  é a evapotranspiração máxima (mm).

O  $k_y$  é um fator de resposta da vegetação à disponibilidade hídrica e expressa a diminuição relativa da produtividade agrícola ( $1 - PR/PM$ ) em função do déficit da evapotranspiração relativa ( $1 - ET_r/ET_m$ ). Normalmente, os valores de  $k_y$  variam entre 0 e 1, mas podem alcançar valores maiores do que 1. Estes valores são específicos para cada cultura e para cada estágio de crescimento (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Os valores de  $k_y$  utilizados neste trabalho foram determinados com base em Villa Nova (2010) e podem ser vistos na Tabela 3.3.

A PM determina a produtividade potencial da cultura em função da limitação imposta pela radiação solar, o tipo de solo, entre outros fatores, descritos nos termos das Equações 3.12 e 3.13 (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A seleção da equação utilizada foi feita de acordo com o valor da taxa de produção de matéria seca da cana-de-açúcar (tm).

Tabela 3.3 - Fator de resposta à produtividade (ky).

| Período | ky   |
|---------|------|
| 1       | 0,7  |
| 2       | 0,75 |
| 3       | 0,8  |
| 4       | 0,9  |
| 5       | 1    |
| 6       | 1,1  |
| 7       | 1,2  |
| 8       | 1,2  |
| 9       | 1,3  |
| 10      | 1,2  |
| 11      | 1,1  |
| 12      | 1    |

Fonte: baseado em Villa Nova (2010).

Desta forma, se  $t_m$  é maior do que  $20 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , então:

$$PM = F_{cc}.Fr.F_{pa}.Fe.ND(F(0,8 + 0,01t_m)t_n + (1-F)(0,5 + 0,025t_m)t_c), \quad (3.12)$$

Caso contrário, se  $t_m$  é menor do que  $20 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ , então:

$$PM = F_{cc}.Fr.F_{pa}.Fe.ND.(F(0,5 + 0,025t_m)t_n + (1-F)(0,5t_m)t_c), \quad (3.13)$$

em que PM é a produtividade agrícola máxima na ausência de deficiência hídrica (TCH),  $F_{cc}$  é o fator de compensação do crescimento, Fr é o fator de respiração,  $F_{pa}$  é o fator de produtividade agrícola, Fe é o fator de estágio de corte da cana-de-açúcar, ND é o passo de cálculo (dias), F é a fração do dia em que o céu está encoberto,  $t_m$  é a taxa de produção de matéria seca para a cultura avaliada ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ),  $t_n$  é a taxa de produção de matéria seca de uma cultura padrão em dias completamente nublados ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ),  $t_c$  é a taxa de produção de uma cultura padrão em dias claros ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ).

A componente espectral do modelo é representada pelo Fcc, que se relaciona com o IAF de acordo com a seguinte equação (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ajustada por BERKA et al., 2003):

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,664 - (0,515 * IAF))}, \quad (3.14)$$

na qual Fcc é o fator de compensação do crescimento e IAF é o índice de área foliar.

A Figura 3.5 mostra a relação do Fcc com o IAF de acordo com Doorenbos e Kassam (1979) e o Fcc calculado pela Equação 3.14.

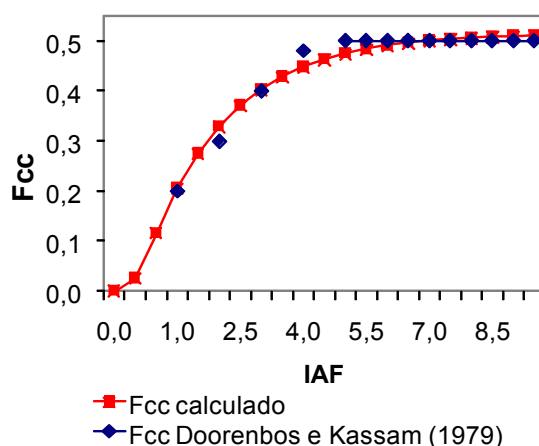


Figura 3.5 - Relação entre o índice de área foliar e o fator de compensação de crescimento.  
Fonte: Doorenbos e Kassam, (1979); ajustada por Berka et al. (2003).

O Fr compensa o gasto de energia que as plantas utilizam no processo de respiração em função da temperatura. Quando a temperatura média é inferior a 20°C, a planta utiliza 40% da energia gerada para a sua própria manutenção. Em temperaturas médias acima de 20°C, utiliza 50% desta energia.

O Fpa ou índice de colheita indica a relação entre a produção de matéria seca e a produção da parte aproveitável comercialmente de uma cultura. No entanto, Doorenbos e Kassam (1979) apresentam este fator para a produtividade

industrial da cana-de-açúcar. Desta forma, o valor de Fpa atribuído foi de 2,3, ajustado por RUDORFF (1985).

Fe é a nova variável inserida no modelo, que ponderou o valor da produtividade agrícola de acordo com o estágio de corte em que a cultura se encontrava. A Tabela 3.4 apresenta os valores de ponderação para cada estágio de corte da cana-de-açúcar, determinados com o auxílio dos dados de produtividade agrícola média do Centro-Sul do Brasil (CTC, 2008). A sua aplicação foi feita com base na estratificação dos mapas do projeto Canasat (Tabela 3.1) (INPE, 2010; RUDORFF et al., 2010).

Tabela 3.4 - Fator de estágio de corte da cana-de-açúcar (Fe).

| <b>Estágio de corte</b> | <b>Fe</b> |
|-------------------------|-----------|
| Indeterminado           | 1         |
| Planta                  | 1,24      |
| Soca 2                  | 1         |
| Soca 3                  | 0,87      |
| Soca 4                  | 0,79      |
| Soca 5                  | 0,76      |

Fonte: calculado com base em CTC (2008).

O ND foi fixado em 16 dias, que é o mesmo período de utilizado na geração dos mosaicos das imagens do produto MOD13Q1 (Tabela 3.2).

A obtenção dos fatores F, tm, tn e tc estão descritos detalhadamente em Doorenbos e Kassam (1979).

Na etapa seguinte, a evapotranspiração máxima (ETm) foi determinada a partir do conceito de evapotranspiração potencial (ETo), dado pela equação:

$$ETm = kc.ETo, \quad (3.15)$$

em que kc é o coeficiente da cultura e ETo é a evapotranspiração potencial, computada pelo método da FAO - Penman-Monteith, descrita em Allen et al. (1998).

Os valores padrões de kc para a cultura da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 3.5 e foram baseados nos trabalhos de Doorenbos e Kassam (1979) e Allen et al. (1998).

A ETr foi determinada por meio do balanço hídrico, que foi calculado pelo método de Thornthwaith e Mather (MOTA, 1979; adaptado por RUDORFF, 1985). Os valores de profundidade do sistema radicular utilizado no cálculo do balanço hídrico podem ser vistos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Coeficiente da cultura (kc) e profundidade do sistema radicular (D).

| Período | kc*  | D (m)** |
|---------|------|---------|
| 1       | 0,4  | 0,5     |
| 2       | 0,5  | 0,6     |
| 3       | 0,6  | 0,7     |
| 4       | 0,7  | 0,8     |
| 5       | 0,8  | 0,9     |
| 6       | 0,9  | 1       |
| 7       | 1    | 1       |
| 8       | 1    | 1       |
| 9       | 1,1  | 1       |
| 10      | 1,1  | 1       |
| 11      | 1,25 | 1       |
| 12      | 1,25 | 1       |

Fonte: \* Baseado em Doorenbos e Kassam (1979) e Allen et al. (1998).

\*\* Picoli (2006).

### 3.7.2 Indicador de produtividade agrícola e indicador de penalização

A variação interanual da produtividade agrícola foi representada pelo indicador de produtividade agrícola (IPA) e obtida pela soma das PR parciais, geradas nos doze períodos avaliados em cada ano safra.

O IPA foi calculado do ano safra 2006/07 para o ano safra 2007/08 e do ano safra 2007/08 para 2008/09, pela seguinte equação:

$$IPA_n = \frac{\sum_1^n PR - \sum_1^n PR_{anterior}}{\sum_1^n PR_{anterior}}, \quad (3.16)$$

em que IPA é o indicador de produtividade agrícola; PR é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos (TCH);  $PR_{anterior}$  é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos de um ano safra anterior para o mesmo período (TCH) e; n é número de períodos durante um ano safra.

A distribuição de frequência dos valores de IPA foi representada na forma de histograma para os anos safra avaliados.

O IPA também foi calculado com base nos dados de produtividade agrícola média das áreas produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, reportados por cada uma das entidades citadas na Tabela 2.2. Em seguida, estes valores de IPA foram confrontados com os valores de IPA calculados com o uso da Equação 3.16.

Outra análise realizada foi por meio do cálculo do IPA acumulado para cada período avaliado ao longo de um ano safra, em que o IPA do período 1 foi calculado pela Equação 3.16 com o uso do PR e do  $PR_{anterior}$  ao período 1. Já o IPA do período 2 foi obtido com a somatória do PR dos períodos 1 e 2 e a somatória do  $PR_{anterior}$  dos períodos 1 e 2, por meio da Equação 3.16. A mesma lógica foi seguida para os demais períodos.

Os valores de IPA foram agrupados por estrato e por RA e comparados com o auxílio das representações em forma de “notched box plot”, conforme descrito no item 3.5.

Contudo, as áreas de *Planta* nos anos safra 2007/08 e 2008/09 não possuíam o valor de PR do ano safra anterior para realizar o cálculo do IPA. Desta forma, um indicador de penalização (IP) foi calculado para ter um indício da evolução

do crescimento vegetativo da cultura ao longo de um ano safra. Os valores de IP variam de 0 a 1, em que o valor igual a 1 representa ausência de déficit e valores menores que 1 representam redução na PM. O cálculo foi realizado com base na metodologia apresentada por Rizzi et al. (2006), de acordo com a seguinte equação:

$$IP_n = \frac{\sum_{1}^n PR}{\sum_{1}^n PM}, \quad (3.17)$$

em que IP é o indicador de penalização da produtividade agrícola; PR é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos (TCH), PM é a produtividade agrícola máxima (TCH) e, n é número de períodos durante um ano safra. O IP também foi utilizado como um dado auxiliar no entendimento dos valores estimados de IPA. Os valores de IP para cada período foram avaliados com o auxílio de “notched box plots”, de acordo com a descrição dada no item 3.5.

### **3.8 Análise preliminar de sensibilidade do modelo agrônômico**

Uma análise preliminar da sensibilidade do modelo agrônômico para a obtenção dos valores de IPA e IP foi realizada para as variáveis precipitação pluviométrica e  $k_y$ .

A influência da variação da precipitação pluviométrica no cálculo do IPA e do IP foi simulado tendo como base os valores estimados pelo modelo regional Eta, de acordo com as condições apresentadas na Tabela 3.6. Estas condições foram aplicadas apenas para o Estrato 35 (Tabela 3.1), onde a variação foi considerada sistemática em cada simulação, nos três anos safra avaliados. As demais variáveis não foram alteradas nestas simulações. Os IPAs e IPs resultantes dos valores simulados de precipitação pluviométrica foram avaliados com o auxílio do resumo das informações na forma de “notched box plot” (MCGILL, 1978).

Tabela 3.6 - Condições de simulação dos valores de precipitação pluviométrica com base nos valores estimados pelo modelo regional Eta.

| <b>Simulação</b> | <b>Diferença em relação à<br/>estimativa do modelo Eta (%)</b> |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1                | -50                                                            |
| 2                | -20                                                            |
| 3                | -10                                                            |
| 4                | -5                                                             |
| 5                | 0 (referência)                                                 |
| 6                | 5                                                              |
| 7                | 10                                                             |
| 8                | 20                                                             |
| 9                | 50                                                             |

A influência do  $k_y$  foi avaliada para a condição em que os valores variaram ao longo do ano safrá, denominado de  *$k_y$  variável* (Tabela 3.3) e para aquele em que o valor de  $k_y$  foi fixado em 1,2 ( *$k_y$  fixo*) (DOORENBOS; KASSAM, 1979) para todos os períodos descritos na Tabela 3.2. Esta avaliação foi feita em todos os estratos listados na Tabela 3.1 e os resultados foram resumidos na forma de “notched box plots” (MCGILL, 1978).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Amostragem e resolução espacial

A utilização dos mapas das áreas de cultivo de cana-de-açúcar do projeto Canasat fornecidos por INPE (2010) foi fundamental na determinação dos estratos e das amostras, pois estes mapas permitiram que o estágio de corte, o tamanho, o formato e a distribuição dos talhões fossem conhecidos. Segundo Guissard et al. (2004), estas informações são relevantes em estudos como o aqui proposto, pois permitem que a amostragem e a escolha de dados de entrada dos modelos agronômicos sejam feitas de forma apropriada.

A quantidade de amostras obtidas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar por estrato e o total para o estado de São Paulo nos três anos safra avaliados é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Quantidade de amostras por estrato e o total de amostras obtidas para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

| Estrato                  | Código | Ano safra      |                |                |
|--------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
|                          |        | 2006/07        | 2007/08        | 2008/09        |
| Indeterminado            | 11     | 48.493         | 48.493         | 48.493         |
| Reforma 2007             | 21     | -              | -              | 10.771         |
| Reforma 2006             | 22     | -              | 10.652         | 10.652         |
| Reforma 2005             | 23     | 10.780         | 10.780         | 10.780         |
| Reforma 2004             | 24     | 8.261          | 8.261          | 8.261          |
| Reforma 2003             | 25     | 13.227         | 13.227         | 13.227         |
| Expansão 2007            | 31     | -              | -              | 34.667         |
| Expansão 2006            | 32     | -              | 28.399         | 28.399         |
| Expansão 2005            | 33     | 12.531         | 12.531         | 12.531         |
| Expansão 2004            | 34     | 7.597          | 7.597          | 7.597          |
| Expansão 2003            | 35     | 4.393          | 4.393          | 4.393          |
| <b>Total de amostras</b> |        | <b>105.282</b> | <b>144.333</b> | <b>189.771</b> |

A quantidade total de amostras de um ano safra para outro aumentou para contemplar as áreas de cana-planta de ano e meio, provenientes de áreas de expansão e de reforma. No entanto, o número e a localização das amostras em cada estrato não variaram ao longo dos anos safra avaliados, pois a amostragem foi feita com base no mapa do ano safra 2008/09.

As somas das amostras no estágio de cana-planta de ano e meio, provenientes de áreas reformadas e de expansão (Tabela 4.1), foram: a) 23.311 em 2006/07, b) 39.051 em 2007/08 e; c) 45.438 em 2008/09. Já que o número de amostras de cana-planta provenientes de áreas reformadas foi praticamente constante ao longo dos anos safra avaliados (Tabela 4.1), estes valores representaram de forma coerente o aumento das áreas novas de cultivo de cana-de-açúcar relatadas pelo projeto Canasat (INPE, 2010). No entanto, a participação proporcional das amostras de cana-planta em relação ao total de amostras reduziu ao longo destes três anos safra. Do total amostrado, estas amostras corresponderam a: a) 22% em 2006/07; b) 16% em 2007/08 e; c) 12% em 2008/09. Esta redução retrata o envelhecimento gradativo dos canaviais, em que os canaviais mais velhos aumentaram proporcionalmente ao aumento das áreas de expansão da cultura.

O total de amostras obtidas para o ano safra 2008/09 corresponde a uma área em torno de 1,2 milhão de hectares, o que equivale a 27% da área total disponível para colheita naquele ano safra (4,4 milhões de hectares) (RUDORFF et al., 2010). O tamanho da área amostrada foi bem inferior à área total cultivada com cana-de-açúcar devido às limitações impostas pela resolução espacial do produto MOD13Q1 e do rigor metodológico adotado neste trabalho, conforme a descrição apresentada no item 3.5.

Em teoria, somente pixels puros de cana-de-açúcar foram selecionados. A Figura 4.1 mostra que na prática, existe a possibilidade de uma pequena porcentagem das amostras estarem contaminadas com a presença de outros

usos e ocupação da terra em função da escala dos mapas temáticos gerados pelo projeto Canasat (INPE, 2010; RUDORFF et al., 2010).

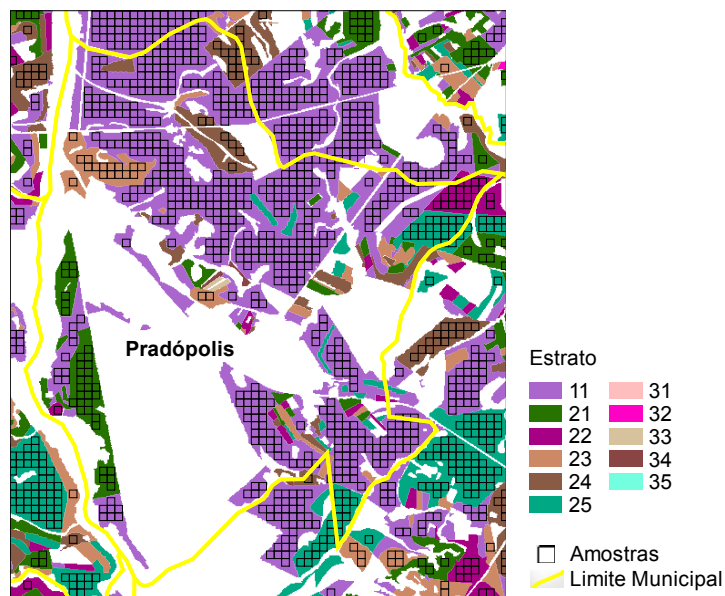


Figura 4.1 - Detalhe das amostras coletadas com base no mapa das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, gerado pelo projeto Canasat (INPE, 2010).

De acordo com Guissard et al. (2004) e Duveiller e Defourny (2010), amostras de pixels puros são capazes de representar áreas homogêneas sem que haja perda de precisão no monitoramento do ciclo de uma cultura agrícola. Desta forma, a amostragem realizada neste estudo não foi um fator limitante para analisar a variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, pois a quantidade de amostras de pixels teoricamente puros é grande (Tabela 4.1) e bem distribuídas dentro do estado (Figura 4.2).

Os dados utilizados no trabalho são compatíveis com a resolução espacial da amostragem, com exceção dos dados de previsão de 24 horas do modelo regional Eta. No entanto, dentre as alternativas operacionais existentes para a obtenção de dados meteorológicos, as previsões geradas por este modelo são as melhores em termos de resolução espacial. Além disso, os dados MOD13Q1 podem suprir parte da deficiência espacial dos dados de previsão

do modelo Eta, pois o IAF derivado deste produto deve expressar em parte os efeitos das variáveis meteorológicas sobre o crescimento de uma cultura agrícola (WIEGAND et al., 1986).

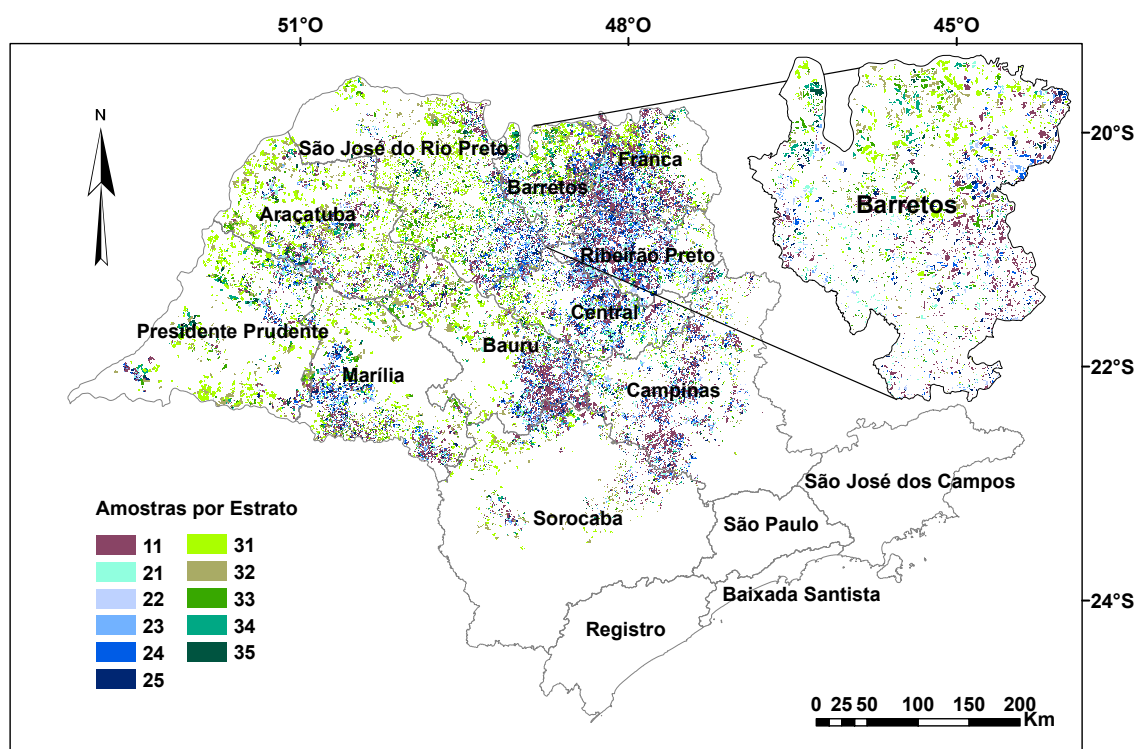


Figura 4.2 - Distribuição das amostras por estrato no estado de São Paulo, com destaque para a região administrativa de Barretos.

A resolução espacial dos dados de entrada do modelo agrônômico tende a melhorar com o avanço tecnológico, e consequentemente, deve ocorrer a melhora da precisão dos resultados gerados. O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho possibilita a alteração dos dados de entrada deste modelo com facilidade, pois a leitura destes dados foi feita com base na localização dos pontos das unidades amostrais e armazenados no formato tabular.

## 4.2 Série temporal do NDVI

O filtro “4253H, Twice” mostrou ser eficiente em função da facilidade e da rapidez na sua aplicação. Exemplos do resultado da aplicação deste filtro podem ser visualizados na Figura 4.3.

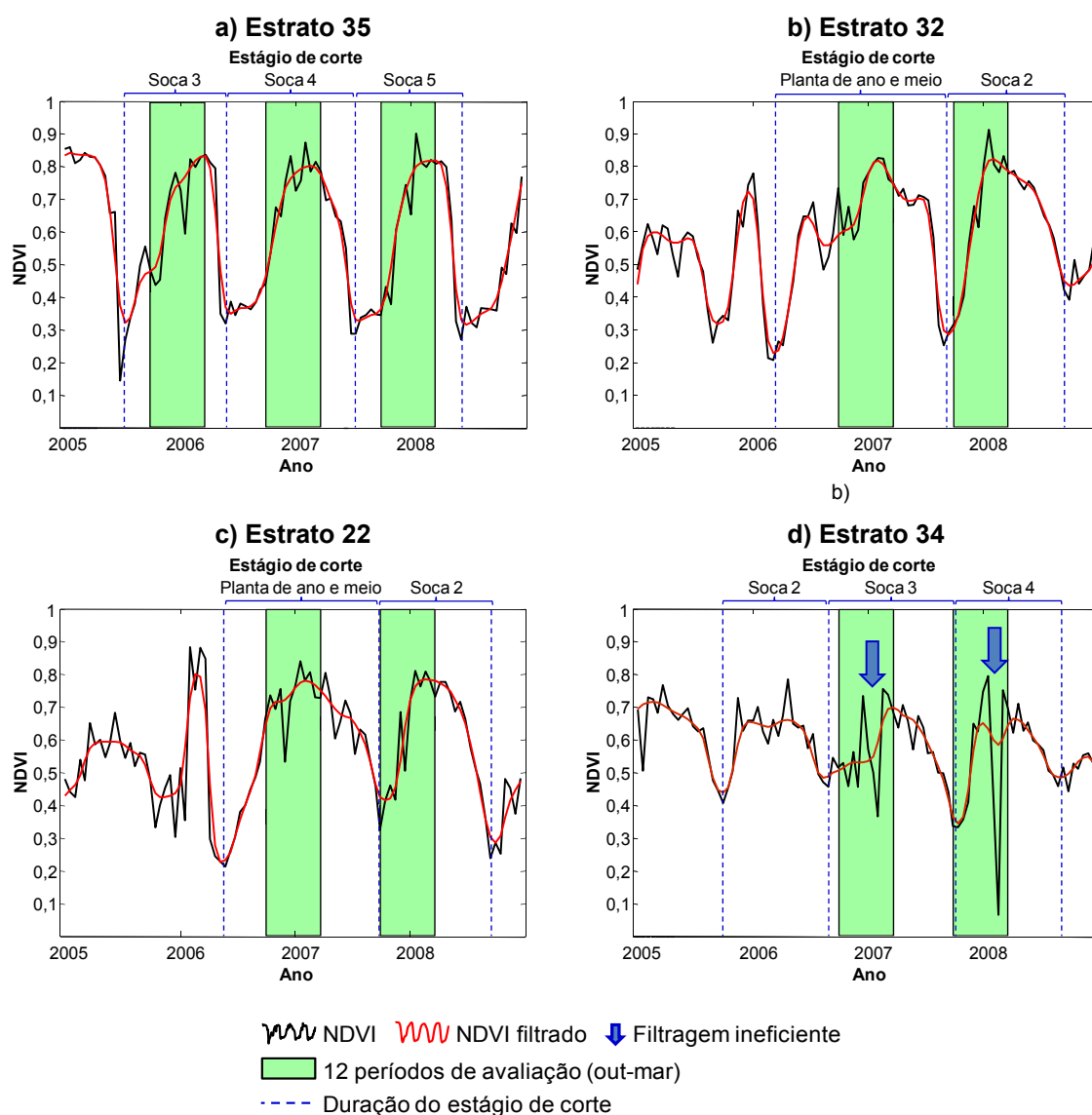


Figura 4.3 - Perfis temporais de um pixel de NDVI proveniente do produto MOD13Q1 sem filtragem e com filtragem entre os anos de 2005 e 2008, a duração dos 12 períodos de avaliação em cada ano safra e os estágios de corte da cana-de-açúcar, pertencentes ao extrato: a) Expansão 2003; b) Expansão 2006; c) Reforma 2006 e; d) Expansão 2004, com filtragem ineficiente.

Contudo, o filtro “4253H, Twice” não foi eficiente para casos em que ocorreu uma variação excessivamente brusca na série temporal, conforme o exemplo apresentado na Figura 4.3d. A filtragem é uma etapa necessária para trabalhos que envolvem análise de séries temporais, pois na grande maioria dos casos elimina ruídos e suaviza os dados, sem perda expressiva de informação.

Os perfis temporais de NDVI apresentados na Figura 4.3 demonstraram que os 12 períodos selecionados em cada ano safra neste estudo representaram os períodos de máxima taxa de crescimento vegetativo das lavouras de cana-de-açúcar, em concordância com o que foi relatado por Casagrande (1991).

A Figura 4.3a mostra o perfil temporal de um pixel pertencente ao estrato 35 (Expansão 2003), onde é possível observar 3 ciclos de cana-soca, com duração de aproximadamente 12 meses em cada ciclo. Já nas Figuras 4.3b e c, pertencentes aos estratos 32 (Expansão 2006) e 22 (Reforma 2006), respectivamente, é possível observar 2 ciclos da cana-de-açúcar, sendo o primeiro de *Planta*, seguido de *Soca 2*, precedidos por uma cultura anual. Os ciclos de *Planta* nos dois exemplos são de cana-planta de ano e meio, pois o perfil temporal de ambos mostrou que do plantio até a colheita (queda brusca do NDVI) se passaram cerca de um ano e meio.

Este fato pode ser observado nos valores de NDVI acumulado nos estratos 23 (Reforma 2006) e 33 (Expansão 2005) (Figura 4.4a), estratos 22 e 32 (Figura 4.4b) e estratos 21 (Reforma 2007) e 31 (Expansão 2007) (Figura 4.4c), onde as medianas dos valores acumulados foram superiores e diferiram dos demais estratos, com nível de significância de 5%.

É interessante notar que as medianas dos NDVIs acumulados decresceram à medida que ocorreu o aumento do número de cortes na cultura de cana-de-açúcar (ao nível de significância de 5%) (Figura 4.4). Este fato é observado tanto para o mesmo estrato ao longo dos anos safra avaliados, como para os diferentes estratos dentro de um ano safra, indicando que os

dados espectrais foram sensíveis à esperada redução de produtividade agrícola observada com o avanço dos estágios de corte da cana-de-açúcar (CTC, 2008).

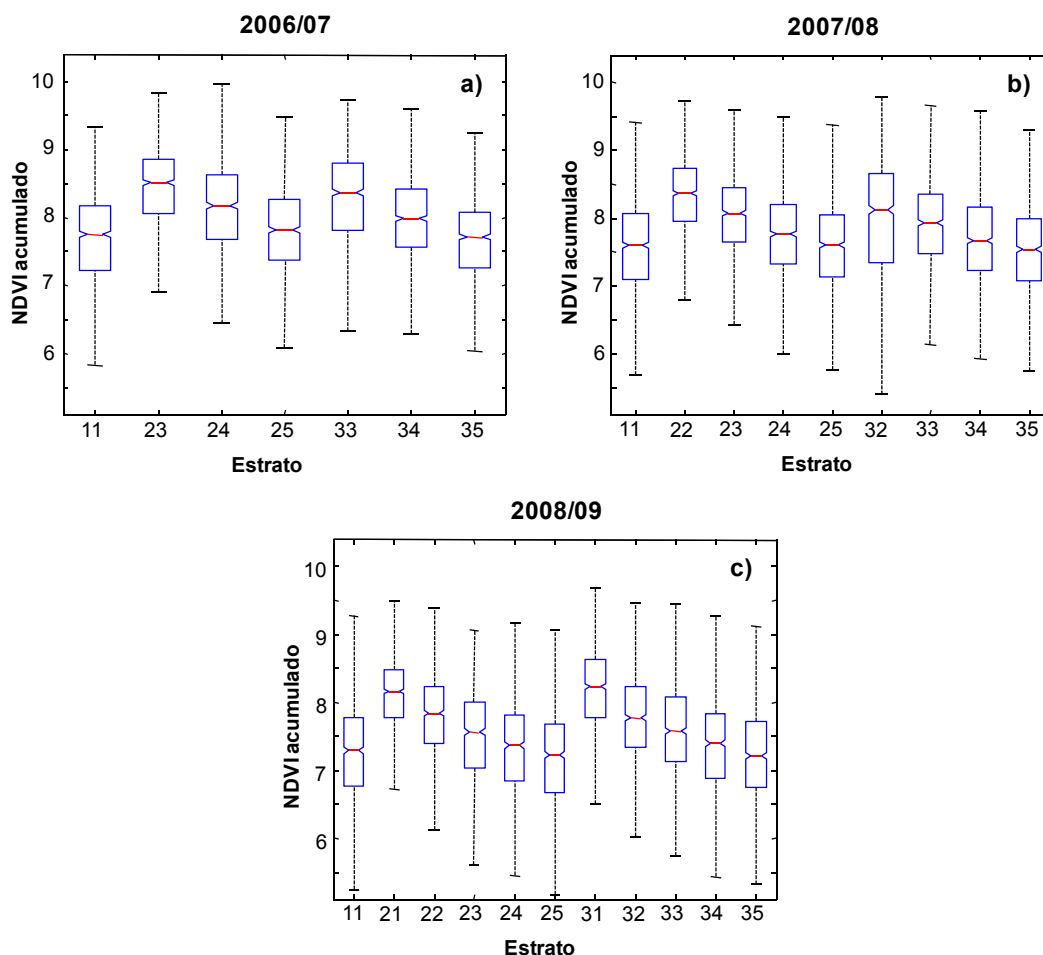


Figura 4.4 - NDVI acumulado nos 12 períodos avaliados por ano safra em cada estrato (Tabela 3.1), nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar amostradas no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2006/07 e; c) 2008/09.

Diferenças expressivas no NDVI acumulado não foram observadas nos estratos com lavouras no mesmo estágio de corte dentro de um mesmo ano safra (Figura 4.4), o que indica que o mesmo valor de Fe pode ser utilizado para as áreas provenientes de reforma e expansão.

As médias do NDVI acumulado para as amostras de áreas de cultivo de cana-de-açúcar avaliadas no estado de São Paulo foram: a) 7,86 em 2006/07;

b) 7,77 em 2007/08 e; c) 7,59 em 2008/09. Os valores médios tenderam a decrescer ao longo dos anos safra analisados por refletir a presença de mais amostras nos estágios de corte de cana-soca do que de cana-planta, aumento este que foi discutido no tópico 4.1.

Desta forma, o NDVI expressou a variação no crescimento vegetativo da cultura da cana-de-açúcar em função do estágio de corte, que diminuiu gradativamente da cana-planta para os estágios mais avançados, o que significa que o uso do Fe no modelo agrônomo é relevante. O uso desta variável só foi possível devido aos mapas gerados pelo projeto Canasat, que permitiram acompanhar a evolução dos estágios de corte da cultura. Desde o início do projeto Canasat havia sido definido como um dos objetivos do projeto, o estabelecimento de mapas temáticos com a distribuição espacial dos estágios de corte da cana-de-açúcar para fins de estimativa de produtividade agrícola.

As variações dos valores de NDVI por período, nos três anos safra podem ser observadas na Figura 4.5. Por meio desta figura é possível notar que a variabilidade do NDVI foi grande nos primeiros períodos avaliados, dado pelas amostras de cana-planta de ano e meio, que estavam mais desenvolvidas vegetativamente e pelas amostras de cana-soca, menos desenvolvidas. Esta variabilidade diminuiu nos períodos finais, onde o crescimento da planta pode ter estabilizado. No entanto, esta estabilidade no crescimento sugeriu que o NDVI para a cultura da cana-de-açúcar saturou próximo de 0,9 (Figura 4.5); ou seja, acima deste valor o NDVI não foi capaz de expressar o aumento de biomassa.

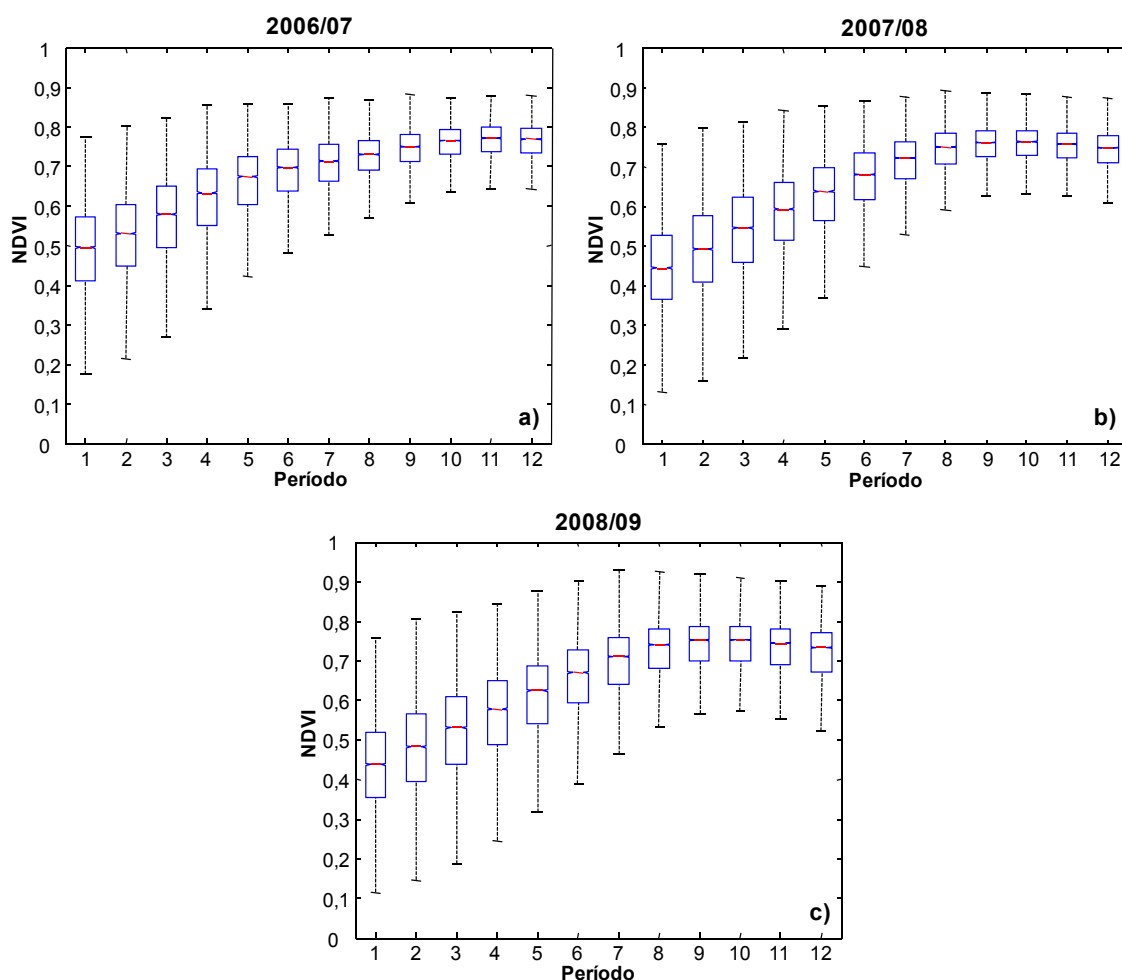


Figura 4.5 - Perfil temporal do NDVI dos 12 períodos avaliados (Tabela 3.2) em três anos safra no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.

### 4.3 Índice de área foliar e fator de compensação do crescimento

A Figura 4.6 mostra as curvas teóricas da relação entre o NDVI e o IAF resultante dos três métodos avaliados neste trabalho, bem como o histograma dos valores de NDVI de todas as amostras coletadas em 12 períodos durante os anos safra de 2006/07, 2007/08, 2008/09.

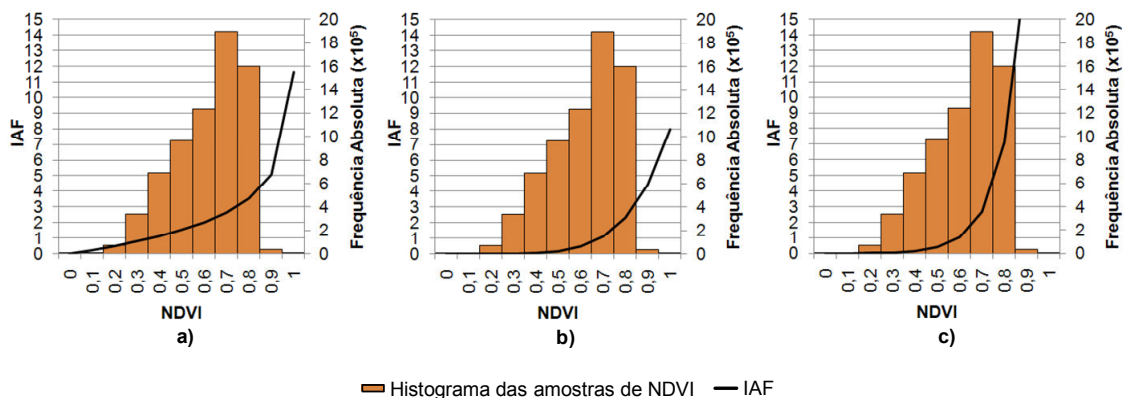


Figura 4.6 - Curva teórica da relação entre o NDVI e o IAF e o histograma dos valores de NDVI das amostras coletadas em 12 períodos para os anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. a) Método 1 (CHOUDHURY et al., 1994; RIZZI; RUDORFF, 2007); b) Método 2 (XAVIER; VETORAZZI, 2004); c) Método 3 (EL HAJJ et al., 2007).

No cálculo de IAF efetuado pelo Método 1 (Figura 4.6a), quando o NDVI apresentou valores em torno de 0,9 a 1,0, o valor de IAF foi de aproximadamente 7. Contudo, pelo Método 2 (Figura 4.6b), nesta mesma condição, o IAF alcançou valores entre 5 e 6 e pelo Método 3 (Figura 4.6c), o valor de IAF tendeu a infinito.

O método selecionado para o cálculo do IAF a partir do NDVI foi o Método 1, pois dentre os três métodos foi o que resultou em valores de IAF mais coerentes (Figura 4.6a), próximos aos valores máximos de IAF relatados por Teruel (1997). Os perfis temporais dos IAF calculados podem ser vistos na Figura 4.7.

A existência de uma grande quantidade de amostras de NDVI com valores em torno de 0,8, seguida de uma queda abrupta da quantidade de amostras de NDVI com valores maiores do que este (Figura 4.6) reforçou a suspeita de que o NDVI da cana-de-açúcar saturou com valor imediatamente abaixo a 0,9. Ou seja, o IAF calculado a partir do NDVI saturou em torno de 4 (Figura 4.7), valor este que é condizente ao relatado por Gobron et al. (1997) e Casa e Jones (2005) para que as relações empíricas entre o NDVI e o IAF

sejam bem sucedidas para fins de acompanhamento do crescimento vegetativo de culturas agrícolas.

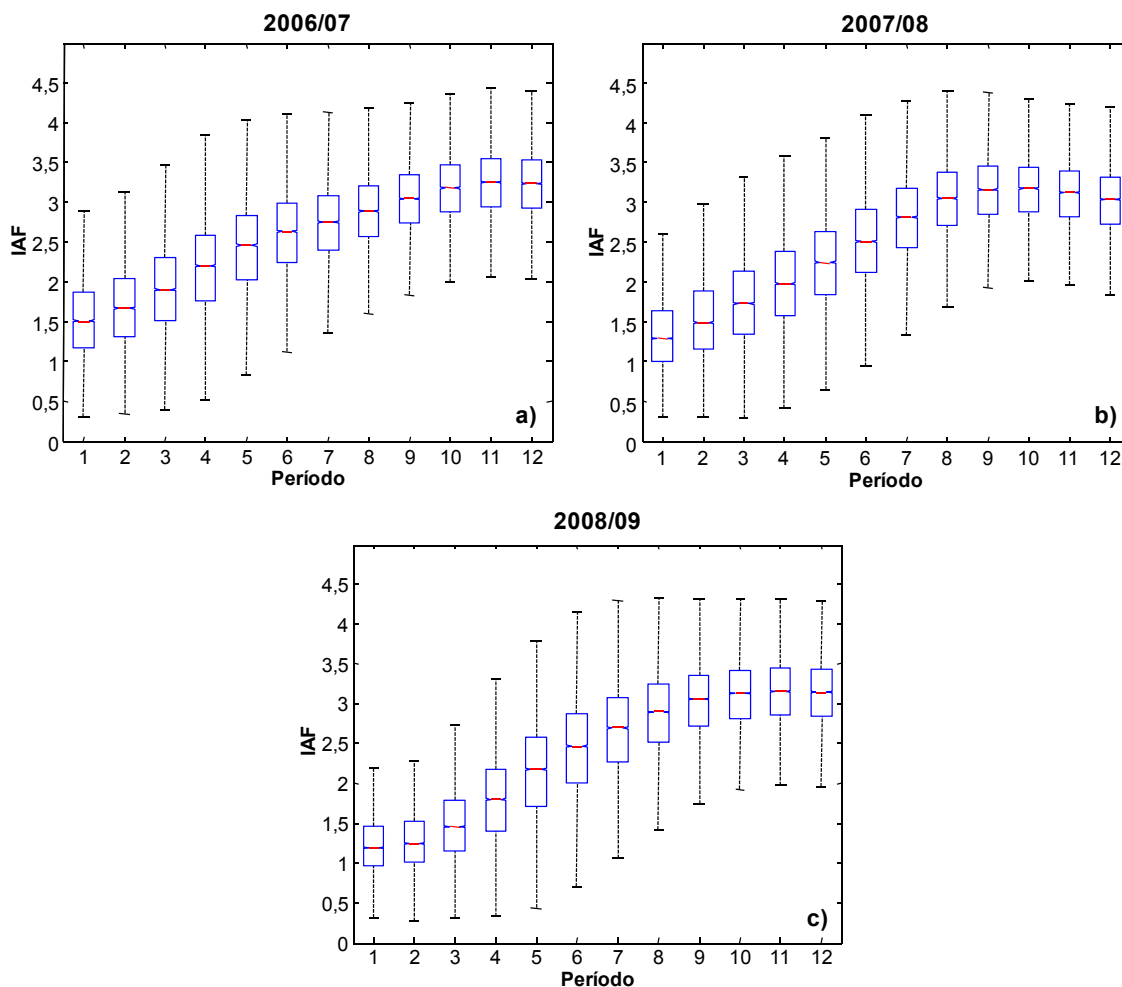


Figura 4.7 - Perfil temporal do IAF resultante da utilização do Método 1 nos 12 períodos avaliados (Tabela 3.2) em cada ano safra no estado de São Paulo: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.

O Fcc calculado a partir do valor de saturação do IAF é de aproximadamente 0,45, que está próximo ao valor de sua saturação ( $F_{cc}=0,5$ ) (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Com isso, o desempenho do modelo agrônomo não deve ser restringido pelos dados de IAF originados das séries temporais de NDVI do produto MOD13Q1.

#### 4.4 Avaliação dos dados estimados pelo modelo regional Eta

Os valores médios da precipitação acumulada, da temperatura mínima e da temperatura máxima por período, em 98 estações meteorológicas do CIIAGRO e as respectivas estimativas feitas pelo modelo regional Eta podem ser vistas na Figura 4.8.

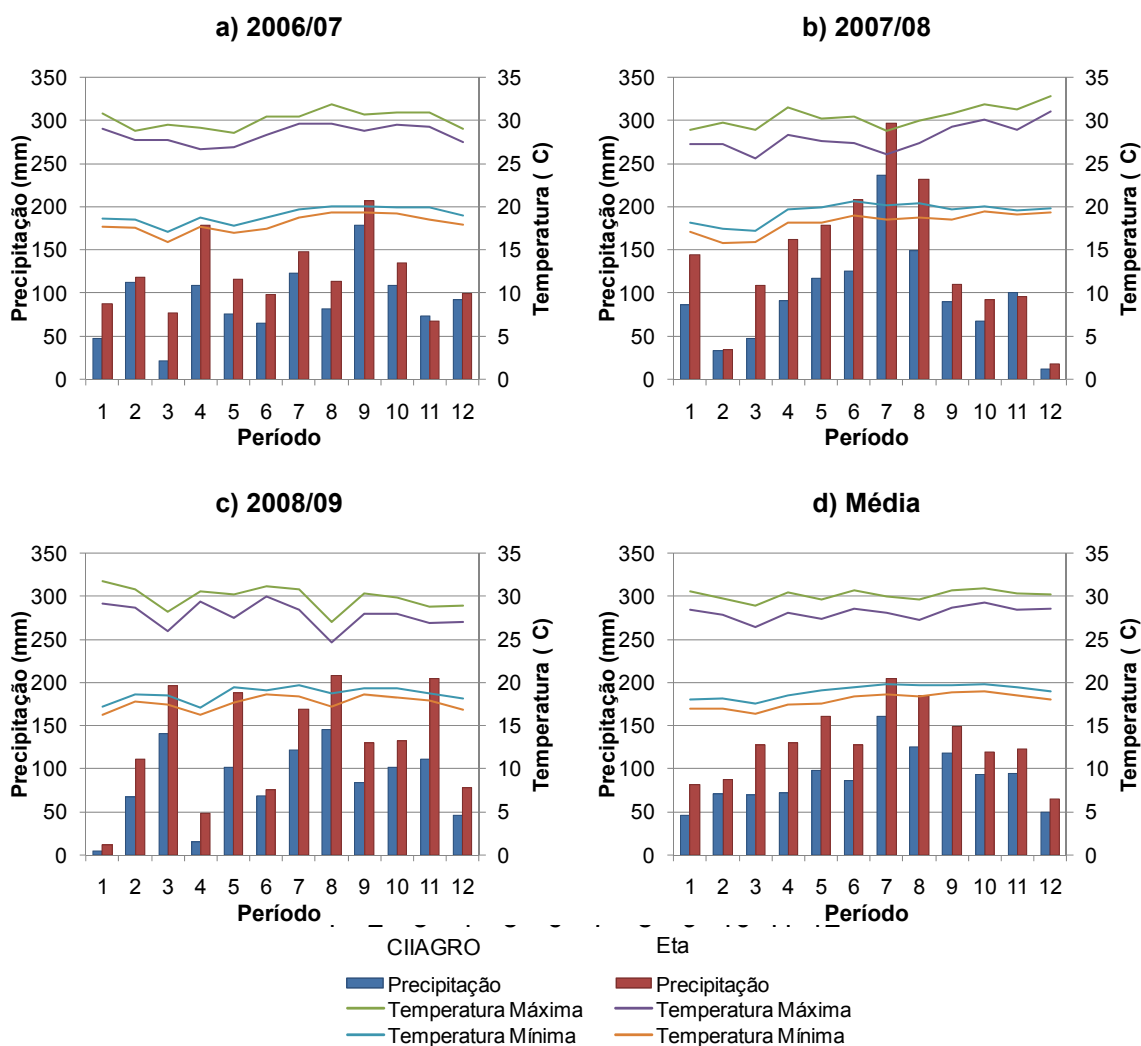


Figura 4.8 - Precipitação acumulada média e temperaturas mínima e máxima médias por período, provenientes de 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (Tabela A.1) e as estimativas do modelo regional Eta correspondentes às localidades destas estações: a) ano safra 2006/07; b) ano safra 2007/08; c) ano safra 2008/09 e; d) média de todos os anos safra avaliados.

A Figura 4.9 mostra a comparação dos valores médios acumulados de precipitação ao longo dos 12 períodos avaliados, provenientes das 98 estações do CIIAGRO (Figura 4.9a) e das estimativas do modelo regional Eta nas localidades correspondentes às estações do CIIAGRO (Figura 4.9b), nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09. Os valores médios acumulados medidos pelas estações do CIIAGRO (Figura 4.9a) são menores em relação aos valores médios acumulados estimados pelo modelo regional Eta (Figura 4.9b), o que mostra que este modelo tende a superestimar os valores de precipitação pluviométrica.

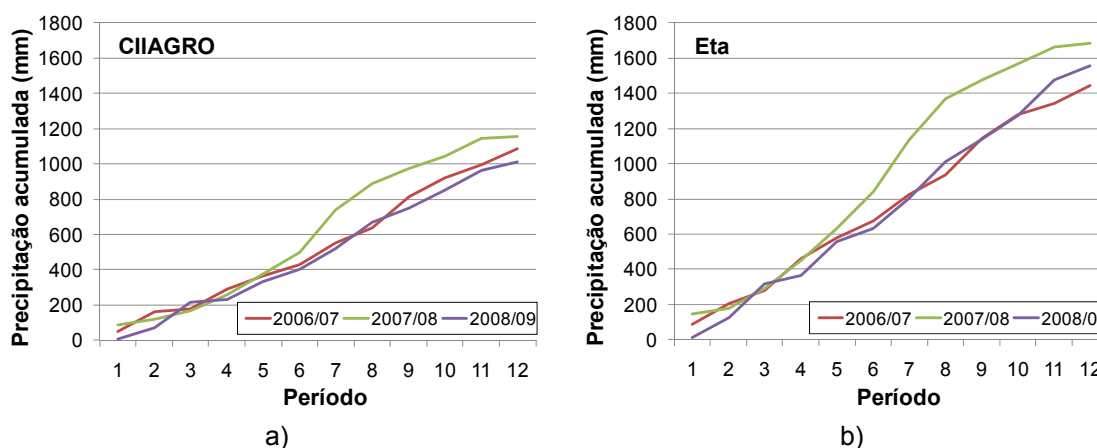


Figura 4.9 - Precipitação acumulada média nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09: a) observadas em 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (Tabela A.1) e; b) estimadas pelo modelo regional Eta nas localidades apresentadas na Tabela A.1.

Os coeficientes lineares (a) e angulares (b) da análise de regressão para a precipitação pluviométrica, a temperatura mínima e a temperatura máxima mostraram que há diferenças significativas entre as estimativas do modelo regional Eta e os dados das estações meteorológicas, nos três anos safra avaliados, bem como na análise conjunta destes três anos safra (Tabela 4.2). No entanto, os valores de  $r$  indicaram que existe uma relação linear positiva entre os dados estimados pelo modelo e os observados nas estações meteorológicas (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Análise de regressão por meio da técnica de Bootstrap entre a precipitação pluviométrica, temperatura mínima e temperatura máxima dos dados de 98 estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas e as estimativas do modelo Eta nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09.

|                                   | Ano safra         |                     |                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
|                                   | 2006/07           | 2007/08             | 2008/09           | Média             |
| <b>Precipitação pluviométrica</b> |                   |                     |                   |                   |
| r                                 | 0,4830 - 0,4866   | 0,7144 - 0,7171     | 0,6522 - 0,6549   | 0,6387 - 0,6407   |
| a                                 | 80,3596 - 80,7533 | 55,2243 - 55,7156   | 63,2342 - 63,6848 | 63,8869 - 64,1547 |
| b                                 | 0,4359 - 0,4401   | 0,8779 - 0,8827     | 0,7830 - 0,7879   | 0,7291 - 0,7319   |
| EMQ                               | 68,2085 - 68,3769 | 101,7738 - 102,1965 | 95,5251 - 95,9053 | 86,6942 - 86,8904 |
| EMA                               | 58,4437 - 58,6084 | 87,3189 - 87,7306   | 84,7881 - 85,1151 | 75,6465 - 75,8221 |
| <b>Temperatura mínima</b>         |                   |                     |                   |                   |
| r                                 | 0,7543 - 0,7567   | 0,7531 - 0,7553     | 0,6986 - 0,7014   | 0,7397 - 0,7411   |
| a                                 | 4,8404 - 4,9101   | 4,8289 - 4,8961     | 6,3134 - 6,3771   | 5,3163 - 5,3566   |
| b                                 | 0,6897 - 0,6935   | 0,6831 - 0,6865     | 0,6022 - 0,6058   | 0,6609 - 0,6630   |
| EMQ                               | 2,1067 - 2,1122   | 2,5355 - 2,5420     | 2,2219 - 2,2270   | 2,2926 - 2,2956   |
| EMA                               | 1,8416 - 1,8474   | 2,2563 - 2,2630     | 1,9320 - 1,9372   | 2,0103 - 2,0132   |
| <b>Temperatura máxima</b>         |                   |                     |                   |                   |
| r                                 | 0,6929 - 0,6950   | 0,7374 - 0,7392     | 0,7191 - 0,7213   | 0,7133 - 0,7145   |
| a                                 | 5,1023 - 5,2338   | 2,6556 - 2,7752     | 3,4069 - 3,5299   | 3,8588 - 3,9266   |
| b                                 | 0,7701 - 0,7743   | 0,8296 - 0,8337     | 0,8116 - 0,8157   | 0,8013 - 0,8037   |
| EMQ                               | 3,4337 - 3,4440   | 4,7089 - 4,7221     | 4,2115 - 4,2231   | 4,1052 - 4,1120   |
| EMA                               | 3,0583 - 3,0685   | 4,4143 - 4,4273     | 3,8303 - 3,8424   | 3,7492 - 3,7564   |

\* Intervalo de confiança de 99%

A precipitação pluviométrica apresentou as maiores diferenças entre os dados observados e estimados, em que os EMQ e EMA variaram de 68 a 102 mm e 58 a 87 mm, respectivamente (Tabela 4.2). Contudo, os erros ocorridos foram diferentes nos três anos safra, o que dificulta a correção deste dado. A variação espacial da precipitação pluviométrica é muito grande dentro de uma célula de 20x20 km, o que sugere que a análise de regressão com base em estações meteorológicas pontuais possa não ser a melhor forma de avaliar esta variável.

As estimativas do modelo regional Eta para as temperaturas mínimas foram superestimadas e para as temperaturas máximas foram subestimadas em relação aos dados das estações do CIIAGRO. Estes resultados estão de acordo com o reportado por Vieira Junior et al. (2009). Os valores de EMQ e EMA de cada variável de temperatura foram semelhantes entre os anos safra avaliados (Tabela 4.2), porém, estes erros não foram sistemáticos, o que está em desacordo com as observações de Vieira Junior et al. (2009). As estimativas das temperaturas mínima e máxima realizadas pelo modelo regional Eta podem ser utilizados no modelo agrônômico de Doorenbos e Kassam (1979), pois os EMQ e EMA observados na comparação com os dados provenientes de estação meteorológica não devem interferir nos resultados obtidos com o uso deste modelo.

Desta forma, os dados meteorológicos provenientes da previsão de 24 horas do modelo regional Eta devem ser utilizados com cautela. No entanto, na falta de dados meteorológicos mais precisos, a realização de pesquisas com estes dados é válida e até mesmo necessária. Além disso, de acordo com o comentário feito no item 4.1, a deficiência destes dados pode ser suprida parcialmente pelo IAF derivado do NDVI do produto MOD13Q1.

#### **4.5 Variação interanual da produtividade agrícola**

O IPA pode variar de valores negativos a positivos, onde os limites mínimos e máximos dependem da variação ocorrida na produtividade agrícola de um ano safra para o outro. A classificação sugerida para os diferentes níveis de variação interanual da produtividade agrícola, de acordo com os valores de IPA é apresentada na Tabela 4.3. Os valores entre -0,01 e 0,01 indicam que não há variação interanual na produtividade agrícola, enquanto que valores acima de 0,3 e abaixo de -0,3 indicam que existe variação interanual extrema na produtividade agrícola.

Tabela 4.3 - Classificação da variação interanual da produtividade agrícola de acordo com os valores do indicador de produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

| <b>IPA</b>    | <b>Variação interanual</b> |
|---------------|----------------------------|
| < -0,30       | Extremamente reduzida      |
| -0,20 a -0,30 | Muito reduzida             |
| -0,20 a -0,10 | Reduzida                   |
| -0,10 a -0,05 | Moderadamente reduzida     |
| -0,05 a -0,01 | Pouco reduzida             |
| -0,01 a 0,01  | Neutra                     |
| 0,01 a 0,05   | Pouco elevada              |
| 0,05 a 0,10   | Moderadamente elevada      |
| 0,10 a 0,20   | Elevada                    |
| 0,20 a 0,30   | Muito elevada              |
| > 0,30        | Extremamente elevada       |

A variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar pode ser analisada de diversas maneiras. A seguir, são apresentadas as análises do IPA para o estado de São Paulo, por estrato, por RA e por unidade amostral.

#### **4.5.1 Para o estado de São Paulo**

As frequências de ocorrência dos valores de IPA calculados com base no modelo agrônomo indicaram que a maior parte dos valores de IPA variaram entre -0,6 e 0,6, em que a maior concentração destes valores do ano safra 2006/07 para 2007/08 foi em torno de 0 (Figura 4.10a) e por volta de -0,1 na comparação do ano safra 2007/08 para 2008/09 (Figura 4.10b).

Os valores médios de IPA calculados para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo com base nos resultados do modelo agrônomo e nos valores de produtividade agrícola divulgados pelas entidades listadas na Tabela 2.3, podem ser vistos na Tabela 4.4.

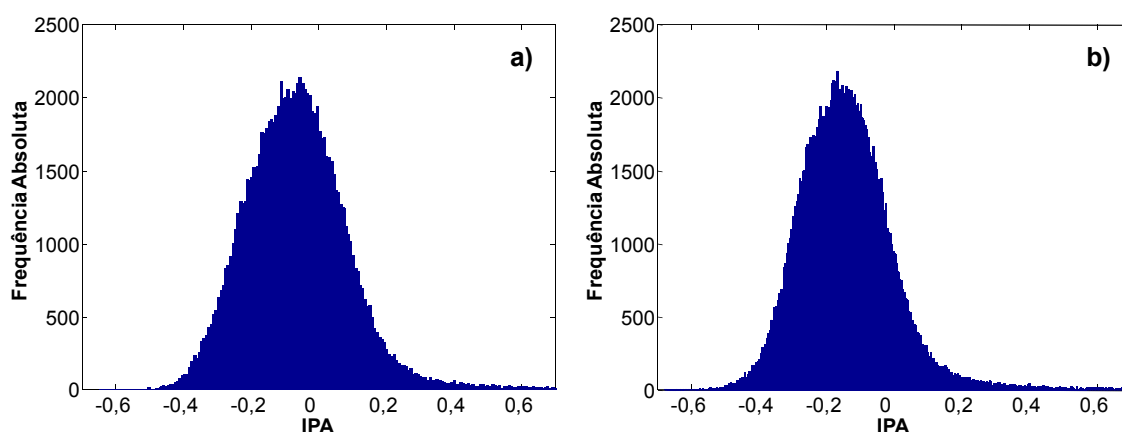


Figura 4.10 - Histograma dos valores de indicador de produtividade agrícola das amostras de áreas de cultivo de cana-de-açúcar avaliadas no estado de São Paulo nos anos safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.

Tabela 4.4 - Indicador de produtividade agrícola médio para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, calculado com base no modelo agrônomo, IBGE, Conab, IEA, Unica/Canasat e CTC, nos anos safra 2006/07 para 2007/08 e 2007/08 para 2008/09.

| Entidade        | IPA                  |                      |
|-----------------|----------------------|----------------------|
|                 | 2006/07 para 2007/08 | 2007/08 para 2008/09 |
| Modelo agrônomo | 0,015                | -0,062               |
| IBGE            | 0,002                | 0,022                |
| Conab           | 0,001                | 0,027                |
| IEA             | 0,015                | 0,012                |
| Unica/Canasat   | -0,036               | 0,102                |
| CTC             | -0,022               | 0,069                |

Conforme a classificação apresentada na Tabela 4.3, o valor de IPA médio estimado pelo modelo agrônomo do ano safra 2006/07 para 2007/08 foi *Pouco elevado*, o que concorda com a observação do IEA e difere apenas ligeiramente dos valores do IBGE e da Conab, que apontaram variação interanual da produtividade agrícola *Neutra* (Tabela 4.4). No entanto, os dados da Unica/Canasat e do CTC para estes mesmos anos safra mostraram que a produtividade foi *Pouco reduzida* (Tabela 4.4).

O IPA médio *Pouco elevado*, estimado pelo modelo agrônômico entre os dois primeiros anos safra avaliados (Tabela 4.4), pode ter ocorrido em função do aumento na precipitação pluviométrica acumulada média do ano safra 2006/07 para 2007/08 (Figura 4.9b). Porém, um aumento maior do IPA pode ter sido restringido pela redução do valor médio de NDVI acumulado no estado, relatado no item 4.2 e nas limitações dos solos quanto ao armazenamento de água (CAD) para comportar todo o aumento da precipitação pluviométrica observada no ano safra 2007/08. Os IPs acumulados ao longo dos 12 períodos avaliados nestas duas safras (Figuras 4.11a e b) demonstraram que as condições de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar foram iguais nos dois primeiros períodos, em que a produtividade agrícola não foi limitada. Nos períodos seguintes as condições foram ligeiramente diferentes, mas as medianas acumuladas do IP no período 12 são iguais. Portanto, o crescimento vegetativo das lavouras de cana-de-açúcar nestes dois anos safra foram semelhantes.

Do ano safra 2007/08 para 2008/09, os resultados do modelo agrônômico sugeriram que a produtividade agrícola foi *Moderadamente reduzida*; porém, as entidades apontaram aumento *Pouco elevado a Moderadamente elevado* desta produtividade entre estes anos safra. Do ponto de vista do modelo agrônômico, a ocorrência deste déficit pode ter sido em função da redução da precipitação acumulada média (Figuras 4.9b) e da redução do NDVI acumulado médio de 2007/08 para 2008/09, ocorrido em função do envelhecimento do canavial (item 4.2). A evolução do IP do ano safra 2008/09 foi diferente ao de 2007/08, mas o seu valor acumulado (período 12) foi praticamente o mesmo. Contudo, a alta penalização ocorrida nos períodos iniciais de crescimento vegetativo, refletiu negativamente no valor médio do IPA estimado do ano safra 2007/08 para 2008/09.

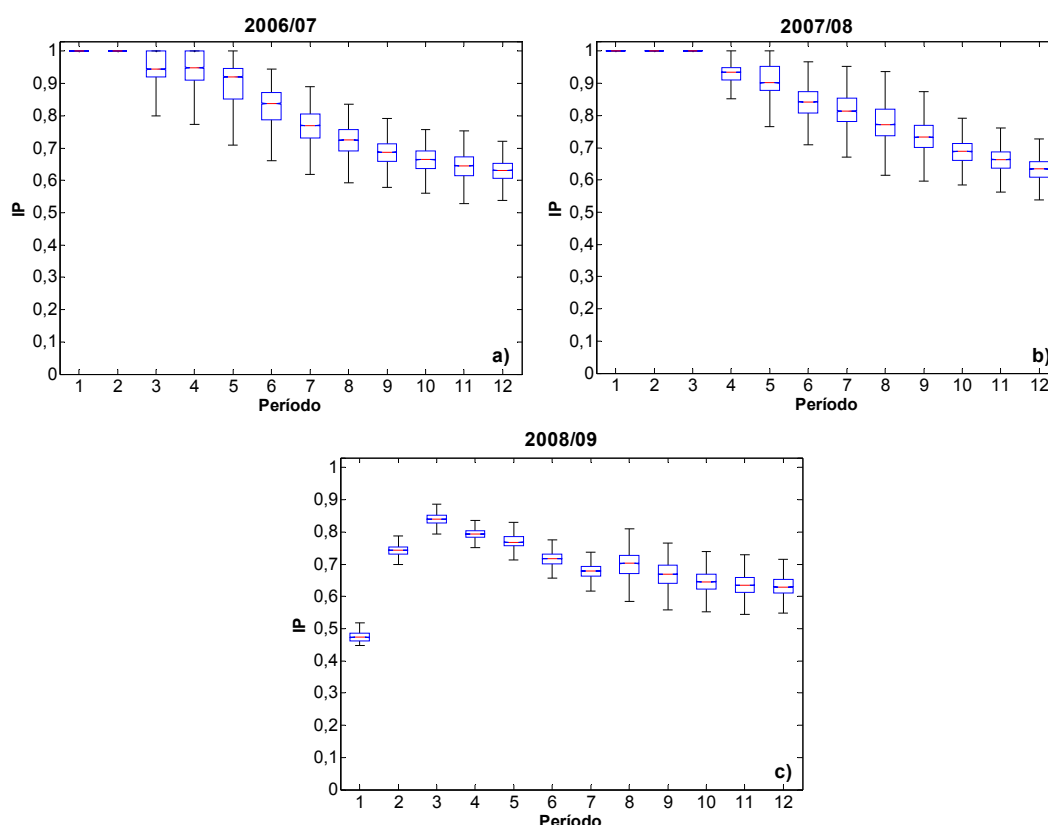


Figura 4.11 - Indicador de penalização acumulado nas amostras das áreas de cultivo com cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos períodos avaliados (Tabela 3.2) dos anos safras: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.

A diversidade dos IPAs calculados com base nos dados divulgados pelas entidades que realizam estimativas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar sugeriu que existe um erro associado a estas estimativas, em função da subjetividade dos métodos empregados por cada entidade (PINO, 2001). Da mesma forma, os IPAs estimados com o uso do modelo agrônomo têm erros associados, decorrentes das limitações inerentes aos modelos e aos dados de entrada (HOOGENBOOM, 2000; MONTEITH, 2000; BATCHELOR et al., 2002; FAIVRE et al., 2004).

#### 4.5.2 Por estrato

A análise do IPA realizada por estrato mostrou que as medianas tiveram diferenças significativas ao nível de 5% entre os estratos, tanto do ano safra

2006/07 para 2007/08 como de 2007/08 para 2008/09 (Figura 4.12a e b, respectivamente).

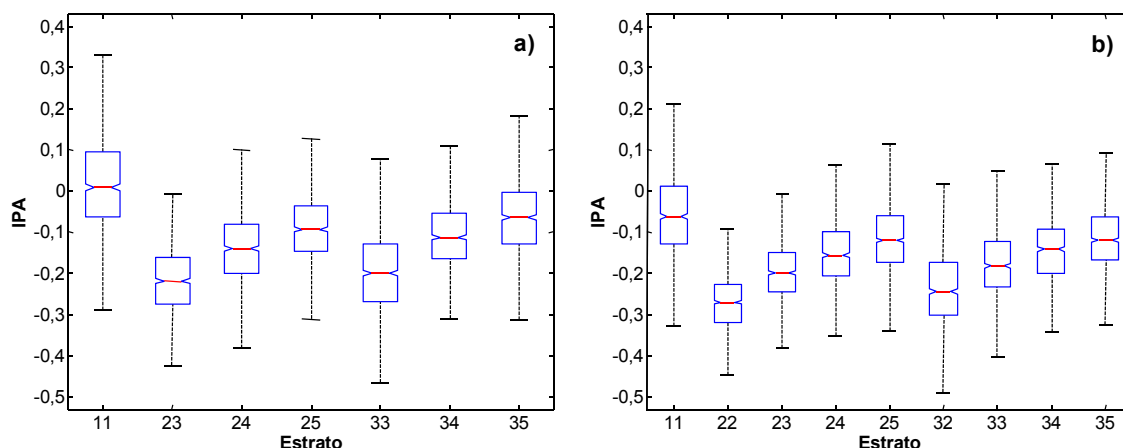


Figura 4.12 - Indicador de produtividade agrícola por estrato nas amostras das áreas plantadas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.

As maiores diferenças do IPA ocorreram nos estratos onde as lavouras de cana-de-açúcar passavam do estágio de *Planta* para *Soca 2* (estratos 23 e 33, na Figura 4.12a e estratos 22 e 32, na Figura 4.12b). Estas diferenças reduziram à medida que cana-socas mais antigas, pertencentes às mesmas amostras, foram comparadas entre si. Este comportamento ocorreu devido à utilização do Fe, que delimitou a PM em função do estágio em que a cultura se encontrava (Tabela 3.4). No entanto, devido à variabilidade observada nos valores de IPA em cada estrato (Figura 4.12) é possível afirmar que as variáveis utilizadas no modelo agrônomo também contribuíram para a composição deste indicador.

A comparação entre estratos nos mesmos estágios e anos safras, provenientes de áreas de reforma e expansão, apontou que há uma ligeira diferença (significativa ao nível de 5%) entre as suas medianas, exceto para os estratos 25 e 35 do ano safra 2007/08 para 2008/09 (Figura 4.12b), que apresentaram as mesmas medianas. Ou seja, outros fatores presentes no modelo

contribuíram para que houvesse esta diferença entre os estratos, já que o Fe é igual para os estratos no mesmo estágio de crescimento vegetativo.

Além disso, a análise do IPA entre estratos que pertencem aos mesmos estágios, mas em anos safras diferentes indicou que as condições ambientais para o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar foram diferentes. Por exemplo, a mediana do estrato 24 (do estágio de corte de *Planta* para *Soca 2*) da Figura 4.12a é superior à mediana do estrato 23 (do estágio de corte de *Planta* para *Soca 2*) da Figura 4.12b, o que indica que as condições de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar foram menos restritivas do ano safra 2006/07 para 2007/08 do que do ano safra 2007/08 para 2008/09, conforme pode ser observado na Figura 4.11.

#### 4.5.3 Por região administrativa

Diferenças foram observadas no agrupamento do IPA por RA, conforme pode ser visto na Figura 4.13.

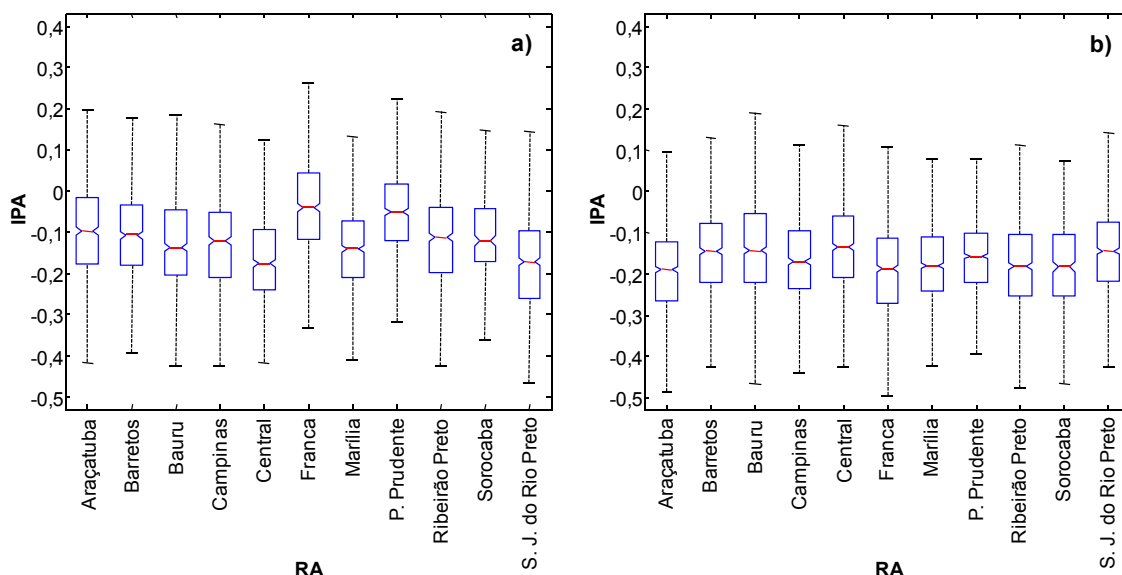


Figura 4.13 - Indicador de produtividade agrícola por região administrativa do estado de São Paulo do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.

Do ano safra 2006/07 para 2007/08, as RAs de Franca e Presidente Prudente destacaram-se das demais em função das medianas do IPA indicarem um decréscimo *Pouco reduzido a Moderadamente reduzido* na produtividade agrícola, enquanto que nas demais a variação interanual da produtividade agrícola foi *Reduzida* (Figura 4.13a, Tabela 4.3). Do ano safra 2007/08 para 2008/09, a variabilidade dos IPA entre as RAs foi menor do que a observada de 2006/07 para 2007/08 (Figuras 4.13a e b). As medianas dos IPAs das RAs de 2007/08 para 2008/09 foram menores em relação à 2006/07 para 2007/08, exceto para as RAs de Bauru, que não apresentou mudança significativa e, Central e São José do Rio Preto, onde foram observados um aumento nas medianas, conforme mostrado nas Figuras 4.13a e b. A redução dos valores de IPA observados na maioria das RAs foi devido ao envelhecimento dos canaviais e aos menores níveis de precipitação observados no ano safra 2008/09 em relação ao ano safra 2007/08 (Figura 4.9b).

Estes resultados mostram que o conhecimento das tendências regionais de variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar são relevantes na composição da estimativa da produtividade agrícola.

#### **4.5.4 Por unidade amostral**

Apesar da discussão do trabalho estar sendo feita em caráter regional, a representação espacial detalhada dos resultados tem importância para auxiliar os especialistas que atuam na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar, pois permite que inferências mais precisas sejam feitas de acordo com a variação do IPA ao nível de unidade amostral.

Um exemplo de representação espacial da variabilidade do IPA pode ser observado na Figura 4.14. O fatiamento dos valores de IPA foi feito com base na classificação apresentada na Tabela 4.3 e nos dados do período 12, que representaram a variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar de um ano safra para outro (Figura 4.14).

A utilização de um SIG permite que o IPA seja representado em diversas aproximações de visualização, que vai desde a observação do estado como um todo, de uma RA, até o detalhe em que as amostras são visualizadas nas unidades amostrais (Figura 4.14). As amostras, os municípios, as RAs e outros agrupamentos podem ter informações associadas em formato tabular, que permitem acompanhar a evolução do IPA ao longo dos períodos analisados.

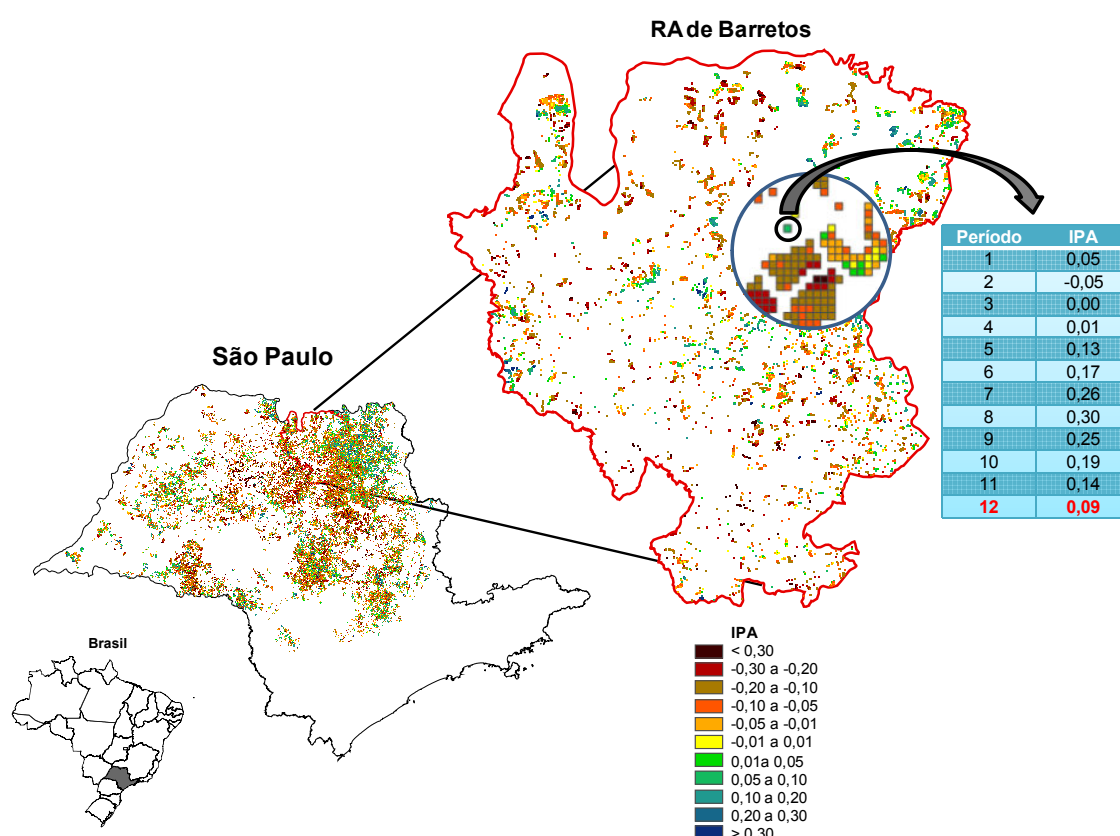


Figura 4.14 - Distribuição espacial do indicador de produtividade agrícola do ano safra 2006/07 para 2007/08 em diversas aproximações de visualização e a tabela associada no nível de detalhe de amostra. O valor em destaque na cor vermelha na tabela é o valor associado às diversas classes de indicador de produtividade agrícola.

#### 4.6 Indicador de penalização intranual da produtividade agrícola

Os IPs foram calculados para os estratos 22 (Figura 4.15a) e 32 (Figura 4.15b) no ano safra 2007/08 e nos estratos 21 (Figura 4.15c) e 31 (Figura 4.15d) no

ano safra 2008/09, devido à inexistência de dados do ano safra anterior para compor o IPA.

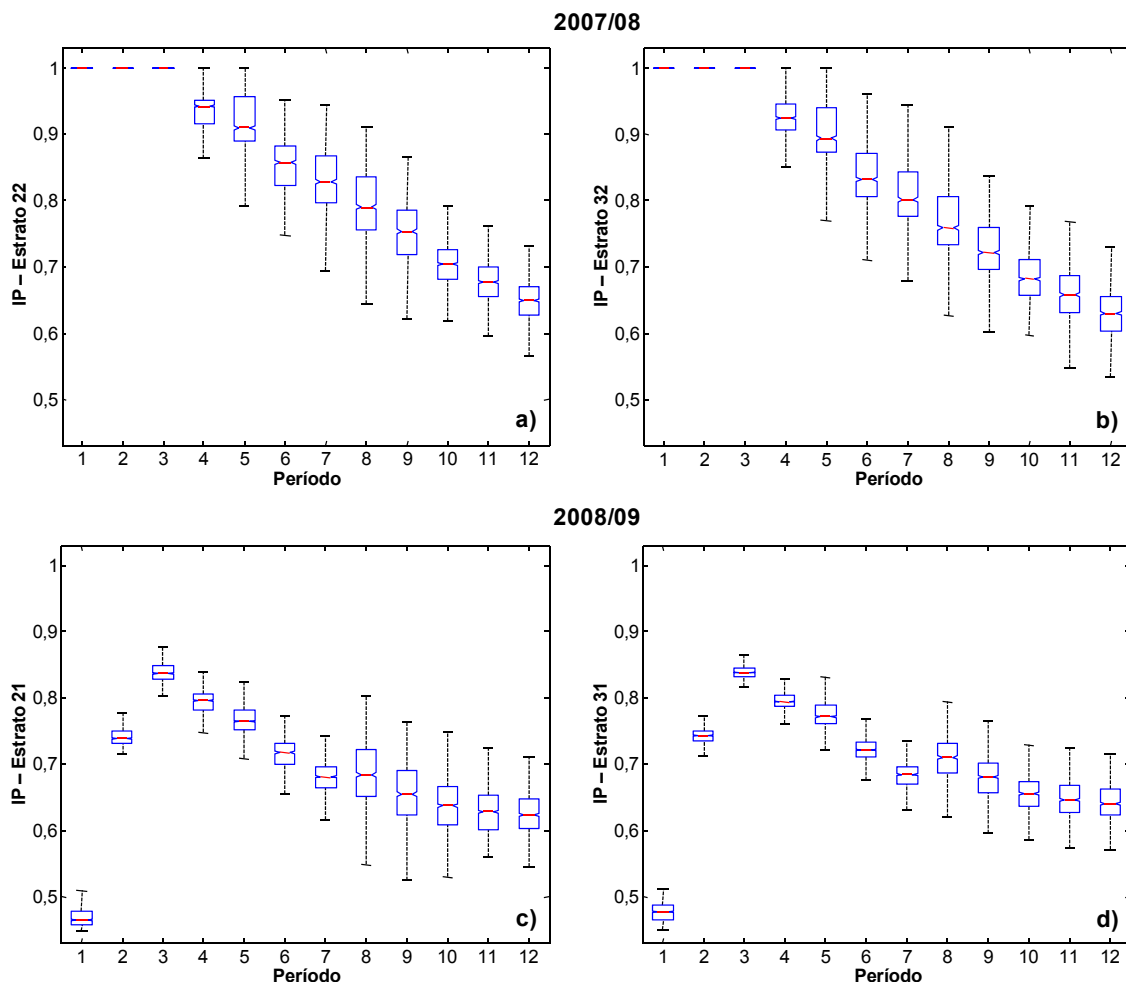


Figura 4.15 - Indicador de penalização para amostras de Planta nos anos safra: a) 2007/08 para o estrato 22; b) 2007/08 para o estrato 32; c) 2008/09 para o estrato 21 e; d) 2008/09 para o estrato 31.

Nas Figuras 4.15a e b é possível observar que os IPs acumulados no período 12 foram semelhantes nos quatro estratos avaliados nos anos safra 2007/08 e 2008/09. No entanto, os IPs mostraram comportamentos diferentes ao longo dos períodos avaliados, sendo que no ano safra 2007/08 a penalização foi maior nos últimos períodos. No ano safra 2008/09 a cultura foi penalizada fortemente no período inicial da avaliação em função de déficit hídrico, seguida

de uma recuperação nos dois períodos seguintes e penalizada novamente até os períodos finais, mas com penalizações em níveis menores do que o ocorrido no período 1. Estes comportamentos são muito semelhantes aos comportamentos dos IPs de todas as amostras analisadas no estado (Figuras 4.11b e c).

Desta forma, os valores de IP mostraram a tendência de que as produtividades agrícolas dos estratos 22 e 32 foram maiores do que as dos estratos 31 e 32. Ou seja, as condições ambientais para o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar foram melhores em 2007/08 do que em 2008/09, de tal forma que se esperaria uma redução na produtividade agrícola do ano safra 2007/08 para 2008/09, conforme indicou o IPA médio calculado pelo modelo agrônomo para estes anos safra e não um aumento, como indicaram os IPAs calculados para as diversas entidades que estimaram a produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Tabela 4.4).

#### **4.7 Análise preliminar de sensibilidade do modelo agrônomo**

##### **4.7.1 Precipitação pluviométrica**

Os valores estimados de IPA nas simulações com -20% até 50% de variação da precipitação pluviométrica não diferiram entre si, tanto na análise do ano safra 2006/07 para 2007/08 (Figura 4.16a), como do ano safra 2007/08 para 2008/09 (Figura 4.16b).

Já os valores de IP, estimados para as mesmas condições de simulação do IPA, não diferiram entre si para as variações da precipitação pluviométrica entre -10% e 50% (Figura 4.17c até i).

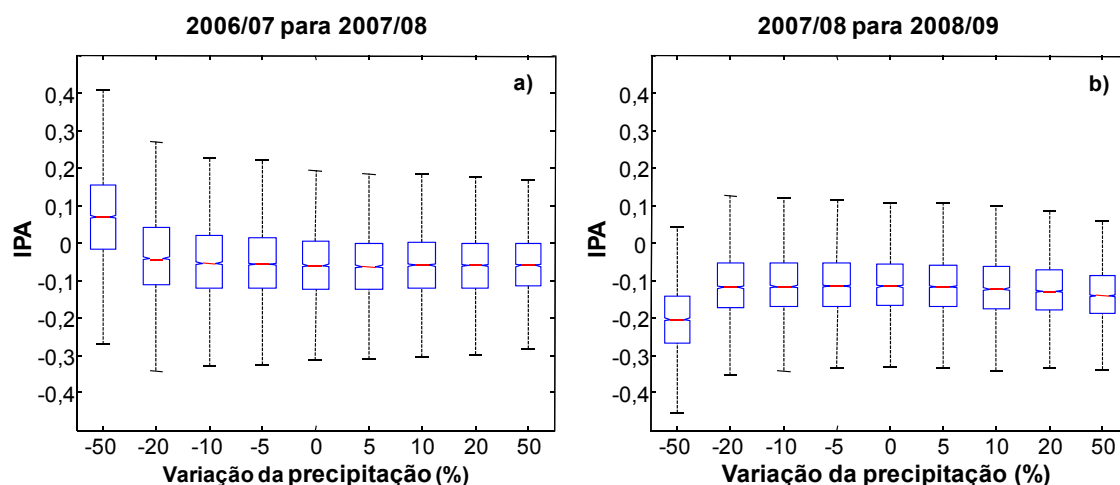


Figura 4.16 - Variação do indicador de produtividade agrícola de acordo com a simulação de valores de precipitação nas amostras do estrato 35 do ano safra: a) 2006/07 para 2007/08 e; b) 2007/08 para 2008/09.

Apesar de os IPs estimados na Simulação 2 (Figura 4.17b) terem apresentado resultados diferentes em relação às demais simulações em cada ano safra, as diferenças de um ano safra para outro foram semelhantes às observadas nas Simulações 3 a 9 (Figura 4.17c até i), resultando em valores de estimados de IPA semelhantes às demais simulações, exceto à Simulação 1.

No entanto, quando a precipitação pluviométrica foi reduzida a 50% do valor de referência (Simulação 1) (Figura 4.17a), diferenças significativas em relação às demais simulações são observadas nos valores de IPA e de IP. O aumento da penalização na Simulação 1 (Figura 4.17a) em relação à Simulação 5 (referência) (Figura 4.17e) foi maior para os anos safra 2006/07 e 2008/09, em relação ao ano safra 2007/08. Com base nos valores de mediana de IPA, este fato indicou que ocorreu acréscimo *Moderadamente elevado* na produtividade agrícola do ano safra 2006/07 para 2007/08 (Figura 4.16a), e decréscimo *Extremamente elevado* do ano safra 2007/08 para 2008/09 (Figura 4.16b).

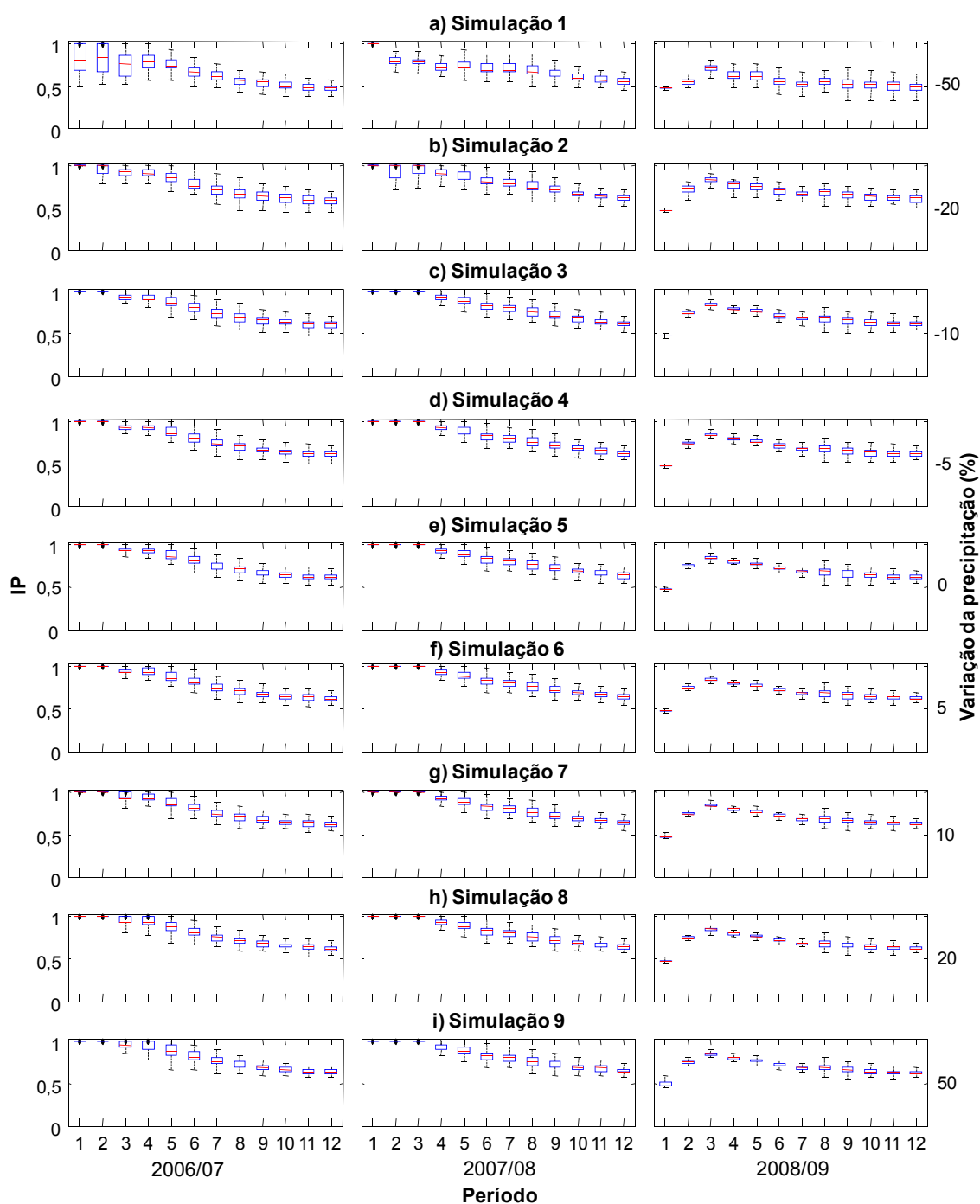


Figura 4.17 - Variação do indicador de penalização de acordo com a simulação de valores de precipitação nas amostras do estrato 35, nos anos safra 2006/07, 2007/08 e 2008/09: a) Simulação 1: -50%; b) Simulação 2: -20%; c) Simulação 3: -10%; d) Simulação 4: -5%; e) Simulação 5: 0%; f) Simulação 6: +5%; g) Simulação 7: +10%; h) Simulação 8: +20% e; i) Simulação 9: +50%.

Valores superestimados de precipitação pluviométrica podem mascarar a presença de déficit hídrico em menor ou maior magnitude, de acordo com a demanda hídrica necessária em cada estágio de crescimento da cultura e, conseqüentemente, mascarar os valores resultantes de IPA. Porém, esta superestimativa pode ser compensada em parte, pela detecção, por meio de dados de SR, do menor crescimento vegetativo ocorrido em função de déficit hídrico.

Além disso, o modelo agrônômico não foi concebido para detectar a ocorrência de excessos hídricos extremos, que podem ser prejudiciais ao crescimento vegetativo da cultura em função de, por exemplo, ocorrer escoamento superficial e falta de aeração no solo. Neste caso, o modelo poderia não penalizar a produtividade agrícola, já que a demanda hídrica estaria suprida.

Contudo, a ocorrência de períodos chuvosos em excesso, tende a reduzir a densidade de fluxo de radiação solar global incidente, que também é uma variável importante para o bom crescimento vegetativo da cana-de-açúcar (ALFONSI et al., 1987; SEGATO et al.; 2006a). A redução da densidade de fluxo de radiação solar global incidente faz com que a PM calculada seja menor em relação aos períodos menos chuvosos. Desta forma, a redução da produtividade agrícola pode ser observada, mesmo em situações de excesso hídrico, já que PR é dependente do valor de PM. Assim, o IPA deve ter preferência na composição da estimativa de produtividade agrícola, pois pode detectar a variação da produtividade agrícola da cana-de-açúcar que não é detectada somente pelo uso do IP. No entanto, o uso do IP é recomendado para auxiliar na explicação da variação do IPA.

#### **4.7.2 Fator de resposta à produtividade**

As variações dos valores de IPA calculados com o uso de *ky variável* e de *ky fixo* podem ser vistos na Figura 4.18.

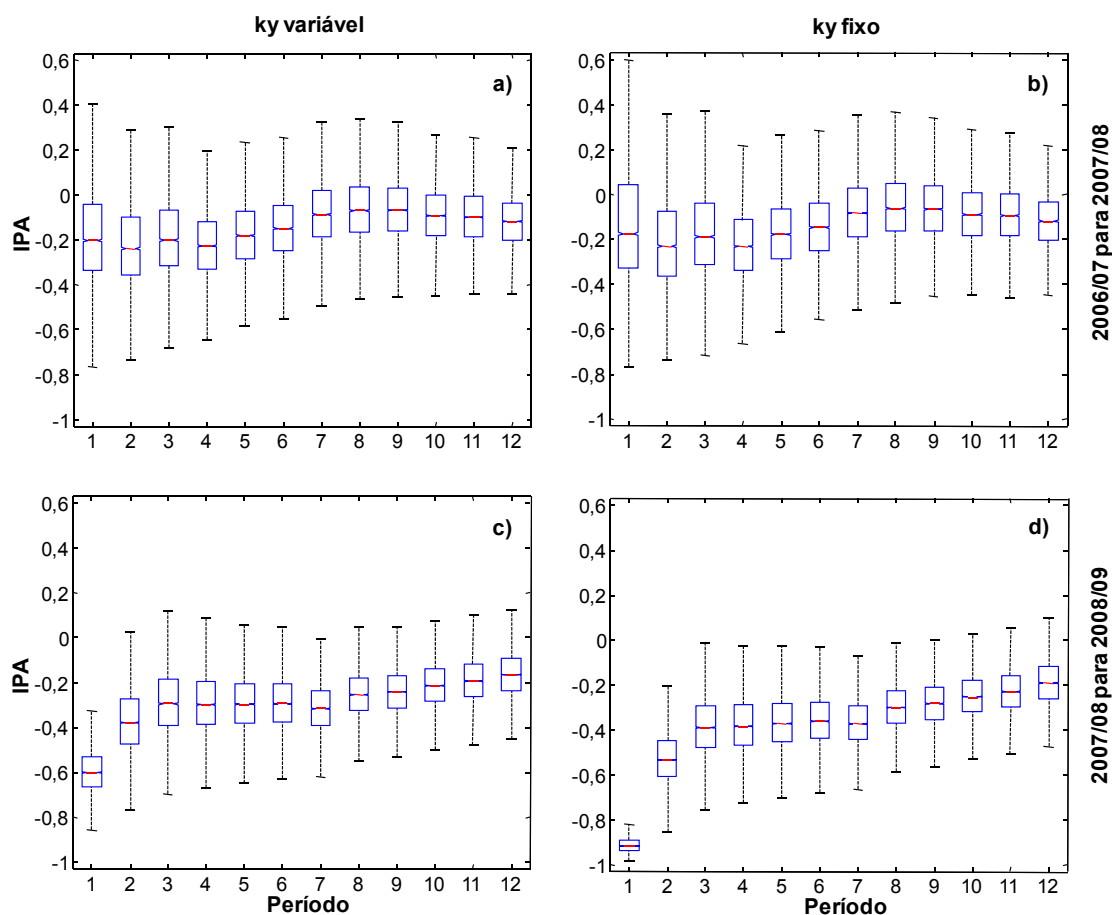


Figura 4.18 - Variação do indicador de produtividade agrícola ao longo dos períodos analisados (Tabela 3.2), do ano safrá: a) 2006/07 para 2007/08 com o uso de *ky variável* (Tabela 3.3); b) 2006/07 para 2007/08 com o uso de *ky fixo* em todos os períodos; c) 2007/08 para 2008/09 com o uso de *ky variável* e; d) 2007/08 para 2008/09 com o uso de *ky fixo* em todos os períodos.

Ao longo dos períodos avaliados do ano safrá 2006/07 para 2007/08, as medianas dos IPAs calculadas com o uso de *ky variável* (Figura 4.18a) e *ky fixo* (Figura 4.18b) não apresentaram diferenças entre si; exceto no período 1, em que as medianas foram ligeiramente diferentes.

As medianas dos IPAs acumulados nos 12 períodos avaliados do ano safrá 2007/08 para 2008/09 foram menores na simulação com *ky fixo* em relação à simulação com *ky variável*, devido às grandes diferenças ocorridas entre eles nos dois primeiros períodos (Figuras 4.18c e d).

Os valores estimados de IP demonstraram a influência do  $ky$  na sua composição, como pode ser observado na Figura 4.11, em que o cálculo foi realizado com valores de  $ky$  *variável* (Tabela 3.3) e na Figura 4.19 com valores de  $ky$  *fixo*. Por estas figuras é possível notar que as penalizações da produtividade agrícola acumulada no período 12, nos três anos safra avaliados, foram maiores para a simulação com o  $ky$  *fixo*.

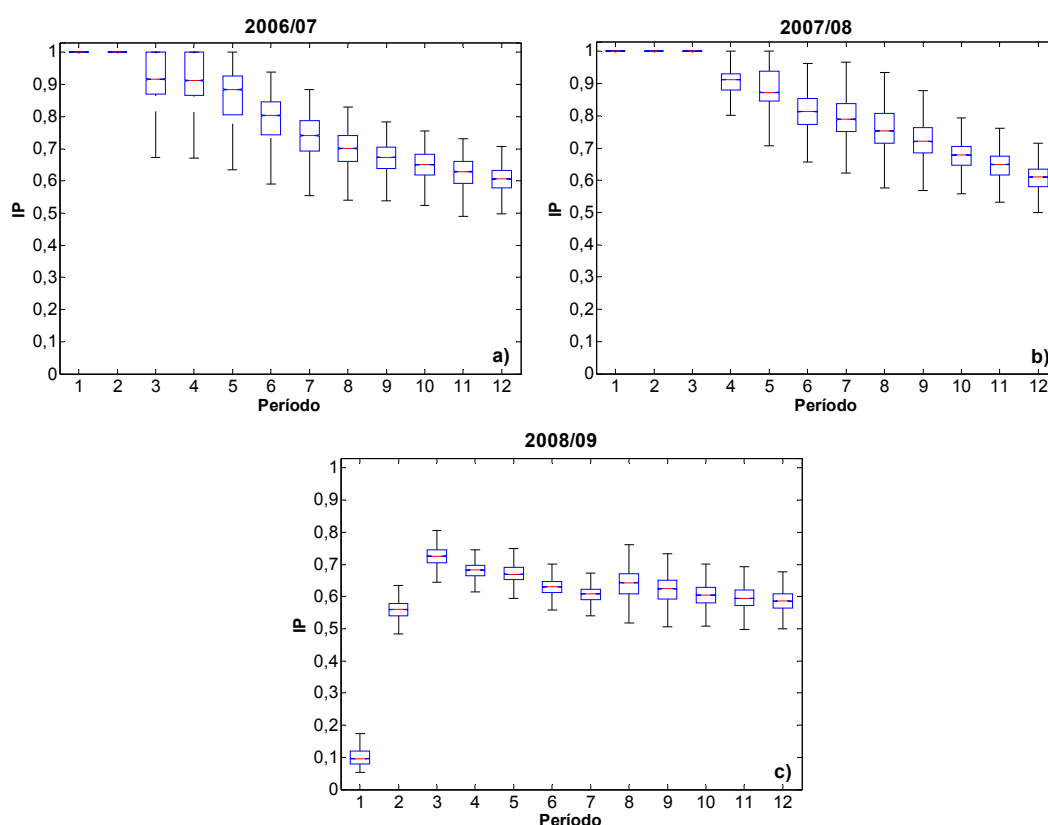


Figura 4.19 - Indicador de penalização acumulado calculado com o valor de  $ky$  *fixo* nas amostras das áreas de cultivo com cana-de-açúcar no estado de São Paulo nos períodos avaliados (Tabela 3.2) dos anos safras: a) 2006/07; b) 2007/08 e; c) 2008/09.

No entanto, o valor de  $ky$  não influenciou a estimativa de IP quando  $ET_r$  foi igual a  $ET_m$ , pois neste caso a demanda hídrica da cultura agrícola é completamente suprida. Este fato pode ser observado nos primeiros períodos dos anos safra 2006/07 e 2007/08, quando os valores de IP iguais a 1 foram

idênticos para a estimativa efetuada com valores de *ky variável* (Figuras 4.11 a e b) e de *ky fixo* (Figuras 4.19 a e b).

Nos casos em que os valores de  $E_{Tr}$  são menores do que  $E_{Tm}$ , a produtividade agrícola é penalizada em função do déficit hídrico. Além do déficit da evapotranspiração relativa, a produtividade agrícola é afetada pelo  $ky$ , em que quanto maior é o valor de  $ky$ , maior é a redução ocorrida na produtividade agrícola.

Este fato demonstra a importância do estabelecimento de valores de  $ky$  coerentes aos estádios de crescimento de uma cultura agrícola.

#### **4.8 Considerações sobre o uso operacional do indicador de produtividade agrícola**

O modelo agrônômico, alimentado por informações provenientes do produto MOD13Q1 e dos dados de previsão do modelo regional Eta, permitiu que diferenças na produtividade agrícola da cana-de-açúcar de uma safra para outra, por meio do IPA, fossem observadas. Estas diferenças foram notadas por estado, por RA, por estrato e por unidade amostral.

No entanto, não é possível afirmar que estas diferenças corresponderam à realidade, já que a tentativa de validação dos valores estimados de IPA no nível estadual foi inconclusiva. Este fato ocorreu em função da divergência de valores de produtividade agrícola divulgados pelas entidades listadas na Tabela 2.2, bem como pelos EMA e EMQ observados nas comparações das variáveis meteorológicas estimadas pelo modelo Eta e observadas nas estações do CIIAGRO (Tabela 4.2). A superestimativa da precipitação pluviométrica pode ter mascarado a presença de déficit hídrico em determinados períodos ao longo dos anos safra avaliados, o que pode ter influenciado na estimativa dos valores de IPA. Contudo, conforme foi discutido no tópico 4.4, os valores de EMA e EMQ podem não representar as diferenças reais entre os valores observados e estimados. Além disso, não foi possível

determinar se os erros presentes nos dados estimados pelo modelo regional Eta foram compensados pelos dados de NDVI do produto MOD13Q1.

As questões levantadas por Hartkamp et al. (1999), Hansen e Jones (2000), Anderson et al. (2003) e Faivre et al. (2004) em relação à espacialização de modelos e de seus dados de entrada, parecem ter sido contornadas com a utilização da metodologia desenvolvida no presente trabalho, exceto no caso dos dados meteorológicos estimados pelo modelo regional Eta. Entretanto, esta questão só poderá ser resolvida quando dados estimados por modelos de previsão meteorológica com resolução espacial mais alta ficarem disponíveis de forma operacional.

Apesar da saturação ocorrida, as séries temporais de NDVI do produto MOD13Q1 mostraram que foram adequados para estudos como o proposto neste trabalho e possuem papel importante no entendimento da variação de séries temporais de IV de culturas agrícolas. Porém, no caso da cana-de-açúcar, este entendimento só foi possível pelo fato de se conhecer a localização e os estágios de corte de cada talhão.

Além disso, o conhecimento dos estágios de corte da cana-de-açúcar foi relevante para a geração da variação interanual da produtividade agrícola, o que mostra a importância do mapeamento anual das áreas de cultivo da cana-de-açúcar realizado pelo projeto Canasat (RUDORFF et al., 2010).

Desta forma, apesar das limitações relatadas, os valores estimados de IPA, aliados aos valores estimados de IP, têm a capacidade de agir como elementos auxiliares no aprimoramento dos valores estimados por especialistas para compor a produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

O uso operacional dos valores estimados de IPA, pelas entidades responsáveis, depende em parte da melhora da qualidade dos dados de entrada do modelo agrônômico e em parte do entendimento, pelo especialista, do valor da informação derivada deste modelo.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos propostos e os resultados alcançados neste trabalho foi possível concluir que:

- a) A adaptação do modelo agronômico para a cana-de-açúcar foi satisfatória e permitiu a obtenção dos valores de IPA e IP;
- b) A introdução da variável Fe teve papel relevante na determinação da variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar;
- c) A estimativa do IAF com base nas séries temporais de NDVI provenientes do produto MOD13Q1 foi satisfatória;
- d) Os erros observados nas estimativas do modelo regional Eta para a precipitação pluviométrica influenciaram os valores de IPA e IP estimados por meio do uso do modelo agronômico. Já os erros ocorridos nas estimativas de temperaturas mínimas e máximas deste modelo não tiveram influência nos valores de IPA e IP estimados pelo modelo agronômico.
- e) A variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar pôde ser acompanhada com o IPA, que permitiu que as diferenças de produtividade agrícola por estado, por RA, por estrato e por unidade amostral fossem observadas;
- f) O IP permitiu acompanhar a variação intranual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio do déficit da evapotranspiração relativa, e consequentemente, do déficit da produtividade relativa. Além disso, este indicador auxiliou na interpretação dos valores estimados de IPA;
- g) A análise preliminar da sensibilidade mostrou que o modelo agronômico é sensível à variação da precipitação pluviométrica e à

variação do valor de fator de resposta à produtividade, onde o impacto desta variação no valor estimado de IPA é dependente do estágio de crescimento vegetativo em que a planta se encontra e da grandeza desta variação.

Desta forma, a metodologia desenvolvida neste trabalho mostrou que os dados de sensoriamento remoto e meteorológicos incorporados em um modelo agrônomo permitiram que a variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar fosse detectada.

As seguintes recomendações são dadas para que a metodologia desenvolvida neste trabalho possa ser utilizada de forma operacional:

- a) Curto prazo: os valores estimados de IPA e de IP sejam avaliados por especialistas que estimam a produtividade agrícola da cana-de-açúcar;
- b) Curto prazo: a data de início de crescimento vegetativo dos talhões seja considerada no modelo agrônomo, pois as lavouras colhidas no início do período da colheita possuem produtividade agrícola maior do que aquelas em que a colheita ocorre no final deste período;
- c) Médio prazo: as estimativas de IPA e de IP sejam melhoradas de acordo com as necessidades apontadas na avaliação realizada pelos especialistas no item a;

Em longo prazo deseja-se que a produtividade agrícola da cana-de-açúcar seja estimada por meio de um modelo agrônomo ajustado de acordo com os resultados das recomendações apresentadas acima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, July 2008.

ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; MOREIRA, M. A.; DEPPE, F. Avaliação de diferentes escalas temporais de chuva obtidos por modelos matemáticos e por sensoriamento remoto para o Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., Florianópolis, SC. 2006. On-line. **Anais...** Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/04.17.17.11>>. Acesso em: 05 Nov. 2010.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; CARVALHO, M. A.; GOLTZ, E.; AULICINO, T. L. I. N.; BRANDÃO, D.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. **Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo – ano safra 2009/2010**. São José dos Campos: INPE, 2010. 153 p. (INPE-16685-RPQ/851). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/04.13.14.27>>. Acesso em: 24 Set. 2010.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.) **Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.

ALLEN, L. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and drainage paper 56).

ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Upscaling and downscaling - A regional view of the soil-plant-atmosphere continuum. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 6, p. 1408-1423, Nov.-Dec. 2003.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 5, p. 615-625, Maio 2007.

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

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v.13, n. 1-2, p. 95-120, Aug. 1995.

BATCHELOR, W. D.; BASSO, B.; PAZ, J. O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 141-158, Dec. 2002.

BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 433-440, Jul.-Sept. 2003.

BOUMAN, B. A. M.; VAN KEULEN, H.; VAN LAAR, H.; RABBINGE, R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, v. 52, n. 2-3, p. 171-198, Oct.-Nov. 1996.

CARREIRAS, J. M. B., PEREIRA, J. M. C., SHIMABUKURO, Y. E.; STROPPIANA, D. Evaluation of compositing algorithms over the Brazilian Amazon using SPOT-4 VEGETATION data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 17, p. 3427-3440, Sep. 2003.

CASA, R.; JONES, H. G. LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 4, p. 414-428, Oct. 2005.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1991. 157 p.

CENTRO DE PESQUISA METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA (Cepagri). **A classificação climática de Koeppén para o estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 26 Ago. 2010.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). **Censo varietal e de produtividade em 2008**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2008. 16 p.

CHOU, S.C. Modelo regional Eta. **Climanálise**, v. 1, n. Ed. Especial, p. 203-207, Out. 1996.

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

COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; GOWER, S. T.; TURNER, D. P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 4, p. 561-571, Apr. 2003.

DANG, A.; WANG, X.; WU, H. GIS based study on the potential grain productivity of China. [CD-ROM]. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2000, Honolulu, 2000. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Publications, 2000.

DE WIT, A. J. W.; BOOGAARD, H. L.; VAN DIEPEN, C. A. Using NOAA–AVHRR estimates of land surface temperature for regional agrometeorological modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 3, p. 187-204, Sept. 2004.

DONATELLI, M.; VAN ITTERSUM, M. K.; BINDI, M.; PORTER, J. R. Modelling cropping systems - Highlights of the symposium and preface to the special issues. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 1-11, Dec. 2002.

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

DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and Modis. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 548-559, Sept. 2004.

DORIGO, W.A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, n. 2, p. 165-193, May 2007.

DUVEILLER, G.; DEFOURNY, P. A conceptual framework to define the spatial resolution requirements for agricultural monitoring using remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2637-2650, Jul. 2010.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy. **Statistical Science**, v. 1, n. 1, p. 54-75, 1986.

EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A.; GUILLAUME, S. Multi-source information fusion: Monitoring sugarcane harvest using multi-temporal images, crop growth modelling, and expert knowledge. In: MULTITEMP-2007, Fourth International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, Provinciehuis Leuven, Belgium, July 18-20, 2007, 6p. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04293064>>. Acesso em: 02 Set. 2010.

EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A.; GUILLAUME, S.; MARTINÉ, J. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices - The case of sugarcane harvest on Reunion Island. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2052-2061, Oct. 2009.

FAIVRE, R.; LEENHARDT, D.; VOLTZ, M.; BENOÎT, M.; PAPY, F.; DEDIEU, G.; WALLACH, D. Spatialising crop models. **Agronomie**, v. 24, n. 4, p. 205-217, May-Jun. 2004.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. 1 CD-ROM.

GOBRON, N., PINTY, B., & VERSTRAETE, M. Theoretical limits to the estimation of the leaf area index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 6, p. 1438-1445, Nov. 1997.

GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.

GUISSARD, V., DEFOURNY, P., LEDENT, J. F. Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. In: 2nd VEGETATION International Users Conference, Antwerp, Belgium, 2004. **Proceedings...** Disponível em:  
<[http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/fullpapers/guissard\\_full.pdf](http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/fullpapers/guissard_full.pdf)>.  
Acesso em 19 Set. 2010.

HAMMER, G.L.; KROPFF, M.J.; SINCLAIR T.R.; PORTER, J.R. Future contributions of crop modelling - from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 15-31, Dec. 2002.

HANSEN, J.W.; JONES, J.W. Scaling-up crop models for climate variability applications. **Agricultural Systems**, v. 65, n. 1, p. 43-72, Jul. 2000.

HARTKAMP, A.D.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information systems with agronomic modelings: A review. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 5, p. 761-772, Sept.-Oct. 1999.

HIRD, J. N.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113 n. 1, p. 248-258, Jan. 2009.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1-2, p. 137-157, Jun. 2000.

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SMITH, D. M.; THORBURN, P. J. Sugarcane Physiology: Integrating from cell to crop to advance sugarcane production. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 115-117, Jun. 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). **Canasat** - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>>. Acesso em: 28 Ago. 2010.

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para cultura da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.) **Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 19-41.

LUCCHESI, A. A. Fatores da produção vegetal. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 1-11.

MACHADO, E. C. Fisiologia da produção de cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.) **Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 56-87.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P.; FAHL, J. I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, vol. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.

MCGILL, R.; TUKEY, J. W.; LARSEN, W. A. Variations of Box Plots. **The American Statistician**, v. 32, n. 1, p. 12-16, Feb. 1978.

MCVICAR, T.R.; JUPP, D.L.B. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on Drought Exceptional Circumstances in Australia: A Review. **Agricultural Systems**, v. 57, n. 3, p. 399-468, Jul. 1998.

MONTEITH, J. L. Agricultural meteorology: evolution and application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1-2, p. 5-9, Jun. 2000.

\_\_\_\_\_. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 695-697, Sep.-Oct. 1996.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of Environmental Physics**. 3. ed. Burlington: Academic Press, 2008. 418p.

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel, 1979. 376 p.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 11-18.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). LAND PROCESS DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (LPDAAC). MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER (Modis) **Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m**. Disponível em: <[https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table/vegetation\\_indices/16\\_day\\_l3\\_global\\_250m/mod13q1](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/vegetation_indices/16_day_l3_global_250m/mod13q1)>. Acesso em: 28 Ago. 2010.

OLIVEIRA, J. B. CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa - Solos, 1999, 64 p + Mapa 1.500.000.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H., IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C. ; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; SILVA, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71-76, Jun. 2007.

PASSIOURA, J. M. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering? **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 690-694, Sept.-Oct. 1996.

PENARIOL, A. L.; SEGATO, S. V. Importância da rotação de culturas na cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Fernandes, C.; Pinto, A. S. **Expansão e renovação de canavial**. Piracicaba: CP 2, 2007. p. 11-18.

PEREIRA, L. L.; TORREZAN, H. F. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. In: Segato, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 333-344.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva**. São José dos Campos, 2006. 90p. (INPE-14669-TDI/1222). Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor Modis na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 789-795, Set. 2009.

PINO, F. A. Estimação subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, v. 31, n. 6, p. 55-58, Jun. 2001.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, Feb. 2003.

RASMUSSEN, E.; CHANDRASEKAR, V.; CLAYSON, C. A.; HAWKINS, J. D.; KATSAROS, K. B.; MCCORMICK, M. P. STEINER, M.; STEPHENS, G. L.; VELDEN, C. S.; WILLIAMSON, R. A.; CUTLER, P.; PROBST, L.; GREENWAY, R. **Assessment of the benefits of extending the tropical rainfall measuring mission: a perspective from the research and operations communities**. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2006. 103 p. Disponível em: <<http://www.nap.edu/catalog/11195.html>>. Acesso em: 02 Set. 2010.

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

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; FONTANA, D. C. Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA. **Ambiente e Água**, v. 1, n. 2, p. 28-38, 2006.

ROUSE JR., J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, 1973. **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. v.1, p. 309-317.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114 p. (INPE-3744-TDL/202). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1985. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.18.22.34.40>>. Acesso em: 05 nov. 2010.

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, Apr. 2010.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183-192, Sep. 1990.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; XAVIER, A. C.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano-safra 2003/04. **Agricultura em São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 21-39, Jan.-Jun. 2005.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. 1 ed. São José dos Campos, SP: Parêntese Editora, 2007. 423p.

RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 241, p. 79-86, Nov./Dez. 2007.

SALOMÉ, J. L.; SAKAI, R. H.; AMBROSANO, E. Viabilidade econômica da rotação de adubos verdes com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 116-119, Out. 2007.

SCOFIELD, R. A. Comments on "A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimador." **Weather and Forecasting**, v. 16, n. 2, p. 277-278, Apr. 2001.

SCOFIELD, R. A. The NESDIS Operational Convective Precipitation-Estimation Technique. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1773-1793, Aug. 1987.

SEGATO, S. V.; ALONSO, O.; LAROSA, G. Terminologias no setor sucroalcooleiro. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006b. p. 397-405.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006a. p. 19-36.

SELLERS, P. J. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. Washington: John Wiley & Sons, 1989. p. 297-335.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 698-704, Sep./Oct. 1996.

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), 21-26 abr. 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 435-442. CD-ROM.

- TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 102, n. 1, p. 64-72, Apr. 2007.
- TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR., L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, v. 54, n. spe, p. 39-44, Jun. 1997.
- VELLEMAN, P. F. Definition and Comparison of Robust Nonlinear Data Smoothing Algorithms. **Journal of the American Statistical Association**, v. 75, n. 371, p. 609-615, Sep. 1980.
- VENÄLÄINEN, A.; HEIKINHEIMO, M. Meteorological data for agricultural applications. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, n. 23-24, p. 1011-1117, 2002.
- VICENTE, G. A.; DAVENPORT, J. C. SCOFIELD, R. A. The role of orographic and parallax corrections on real time high resolution satellite estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 2, p. 221-230, 2002.
- VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; CHOU, S. C.; MARTIN, T. N. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 39, n. 2, p. 412-420, Mar-Abr. 2009.
- VILLA NOVA, N. A. Relação entre clima e a variabilidade de instalação de empresa sucroalcooleira. **Revista Opiniões**.  
<<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=754>>.  
Acesso em 25 Jun. 2010.
- WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; NIXON, P. R. Spectral components analysis: A bridge between spectral observations and agrometeorological crop models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-24, n. 1, p. 83-89, Jan. 1986.
- WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K.; ROBESON, S. M. Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 3, p. 749-752, Jan. 2009.
- XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1661-1672, May 2004.



## APÊNDICE A - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS (CIIAGRO)

Tabela A.1 - Lista das estações meteorológicas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas utilizadas na comparação com os dados de previsão do modelo regional Eta.

| <b>Localidade</b>       | <b>Lat.</b> | <b>Long.</b> | <b>Localidade</b>      | <b>Lat.</b> | <b>Long.</b> |
|-------------------------|-------------|--------------|------------------------|-------------|--------------|
| Adamantina              | -21,68      | -51,08       | Maracaí                | -22,57      | -50,65       |
| Andradina               | -20,90      | -51,37       | Marília                | -22,23      | -49,95       |
| Araçatuba               | -21,20      | -50,45       | Matão                  | -21,60      | -48,38       |
| Araraquara              | -21,80      | -48,18       | Miracatú               | -24,28      | -47,47       |
| Assis                   | -22,67      | -50,43       | Mirandópolis           | -21,15      | -51,08       |
| Atibaia                 | -23,12      | -46,57       | Mir. do Paranapanema   | -22,30      | -51,92       |
| Auriflama               | -20,68      | -50,57       | Mococa                 | -21,47      | -47,02       |
| Avaré                   | -23,10      | -48,93       | Monte Alegre do Sul    | -22,68      | -46,72       |
| Batatais                | -20,89      | -47,59       | Monte Aprazível        | -20,77      | -49,71       |
| Bauru                   | -22,33      | -49,07       | Nova Odessa            | -22,78      | -47,45       |
| Bebedouro               | -20,95      | -48,48       | Osvaldo Cruz           | -21,78      | -50,90       |
| Bofete                  | -23,07      | -48,27       | Ourinhos               | -22,94      | -49,77       |
| Bragança Paulista       | -22,97      | -46,55       | Palmital               | -22,80      | -50,20       |
| Buritama                | -21,05      | -50,13       | Paraguaçu Paulista     | -22,40      | -50,55       |
| Campinas                | -22,90      | -47,08       | Pariquera-Açu          | -24,72      | -47,88       |
| Campos do Jordão        | -22,73      | -45,58       | Paulínia               | -22,77      | -47,15       |
| Cananéia                | -25,02      | -47,93       | Pedrinhas Paulista     | -22,82      | -50,78       |
| Cândido Mota            | -22,70      | -50,38       | Penápolis              | -21,42      | -50,07       |
| Capão Bonito            | -24,00      | -48,37       | Piacatu                | -21,58      | -50,60       |
| Capivari                | -23,00      | -47,52       | Piedade                | -23,72      | -47,42       |
| Casa Branca             | -21,77      | -47,08       | Pindamonhangaba        | -22,92      | -45,45       |
| Catanduva               | -21,13      | -48,98       | Pindorama              | -21,22      | -48,93       |
| Cristais Paulista       | -20,42      | -47,42       | Piracaiá               | -23,05      | -46,35       |
| Echaporã                | -22,43      | -50,20       | Piracicaba             | -22,72      | -47,63       |
| Espírito Sto. do Pinhal | -22,05      | -46,75       | Presidente Prudente    | -22,12      | -51,40       |
| Florínea                | -22,92      | -50,70       | Registro               | -24,48      | -47,85       |
| Gália                   | -22,32      | -49,57       | Ribeirão Preto         | -21,18      | -47,80       |
| Garça                   | -22,20      | -49,65       | Sta. Bárbara D'Oeste   | -22,75      | -47,42       |
| Guaíra                  | -20,33      | -48,30       | Sta. Cruz do Rio Pardo | -22,92      | -49,65       |
| Guarulhos               | -23,47      | -46,52       | Santa Fé do Sul        | -20,22      | -50,93       |
| Ibirarema               | -22,82      | -50,08       | São Carlos             | -22,02      | -47,88       |
| Ibiúna                  | -23,67      | -47,22       | São Paulo              | -23,55      | -46,62       |
| Iepê                    | -22,67      | -51,08       | São Pedro              | -22,55      | -47,93       |
| Iguape                  | -24,70      | -47,55       | São Roque              | -23,53      | -47,13       |
| Ilha Solteira           | -20,40      | -51,33       | São Simão              | -21,47      | -47,55       |
| Ipaussu                 | -23,08      | -49,59       | Sete Barras            | -24,38      | -47,93       |
| Itapetininga            | -23,58      | -48,05       | Sorocaba               | -23,50      | -47,45       |
| Itapeva                 | -23,97      | -48,90       | Sumaré                 | -22,83      | -47,27       |
| Itararé                 | -24,12      | -49,33       | Tarumã                 | -22,79      | -50,54       |
| Itatiba                 | -23,00      | -46,85       | Tatuí                  | -23,37      | -47,87       |

(continuação)

Tabela A.1 - Continuação

| <b>Localidade</b> | <b>Lat.</b> | <b>Long.</b> | <b>Localidade</b>    | <b>Lat.</b> | <b>Long.</b> |
|-------------------|-------------|--------------|----------------------|-------------|--------------|
| Jaboticabal       | -21,27      | -48,32       | Taubaté              | -23,35      | -45,57       |
| Jacupiranga       | -24,72      | -48,00       | Tietê                | -23,12      | -47,72       |
| Jales             | -20,27      | -50,57       | Tupã                 | -21,93      | -50,52       |
| Jaú               | -22,28      | -48,57       | Tupi Paulista        | -21,38      | -51,58       |
| José Bonifácio    | -21,07      | -49,70       | Ubatuba              | -23,45      | -45,07       |
| Jundiaí           | -23,20      | -46,88       | Valparaíso           | -21,23      | -50,88       |
| Limeira           | -22,53      | -47,45       | Vargem               | -22,90      | -46,42       |
| Lins              | -21,67      | -49,77       | Vargem Grande do Sul | -21,83      | -46,88       |
| Manduri           | -23,07      | -49,35       | Votuporanga          | -20,42      | -49,98       |

Fonte: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/>