



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.22.18.12-TDI

**APLICAÇÃO DE UM MODELO
AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL E DE
VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DO MODELO ETA
PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE DO TRIGO**

Sulimar Munira Caparoci Nogueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Maurício Alves Moreira, aprovada em 03 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GBRAHL>>

INPE
São José dos Campos
2014

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:**

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

Membros:

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

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

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.22.18.12-TDI

**APLICAÇÃO DE UM MODELO
AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL E DE
VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DO MODELO ETA
PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE DO TRIGO**

Sulimar Munira Caparoci Nogueira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Maurício Alves Moreira, aprovada em 03 de junho de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GBRAHL>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nogueira, Sulimar Munira Caparoci.

N689a Aplicação de um modelo agrometeorológico-espectral e de variáveis meteorológicas do modelo ETA para estimar a produtividade do trigo / Sulimar Munira Caparoci Nogueira. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xviii + 87 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.22.18.12-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. Maurício Alves Moreira.

1. Produtividade. 2. Sensoriamento remoto. 3. Trigo. I.Título.

CDU 528.88:633.11



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

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

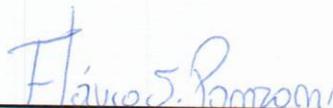
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Maurício Alves Moreira



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Luciana Miura Sugawara



Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Sulimar Munira Caparoci Nogueira**

São José dos Campos, 03 de Junho de 2014

“Tudo que acontece com naturalidade tem mais sabor. Tudo ao seu tempo tem mais harmonia. Não queiras forçar nada, pois Deus e Cristo entendem as tuas necessidades, colocando em tuas mãos o que é necessário à tua ascensão”. (Iniciação – Viagem Astral)

“Qual é a relação entre ser grato e ser feliz? É realmente um caminho. As pessoas gratas se tornam mais felizes por serem gratas. É a gratidão que traz a felicidade. Se vocês pensam que é a felicidade que os torna gratos, pensem novamente. É a gratidão que os torna felizes. Tem pessoas que têm tudo, mas não são felizes porque não são gratas.” (Monge David Steindl-Rast)

AGRADECIMENTOS

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

A meu pai João, pela educação, amor, companheirismo, amizade e principalmente por aturar minhas reclamações.

As minhas irmãs Samira e Angela pelo amor, respeito, carinho, companheirismo e paciência incondicionais. Por todos os motivos pra sorrir e sorrisos sem motivos, todas as palavras de conforto e olhares encantadores.

Agradecimentos sinceros e eternos a Dona Ivone pelo carinho e incentivo.

A meus queridos amigos Mariane, Gabriela Morello, Renato Serra, Marcelo Mitsumoto, Marilia Thomaz, Elisandra Amendola, Carina Macedo, Guilherme Mataveli, Bruno Oliveira e Bruno Schultz pela paciência, amizade e respeito.

Aos queridos Emília Hamada, Tadeu Lana e Elias pela amizade, conselhos e apoio.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O monitoramento preciso e oportuno do estado das culturas agrícolas e estimativa da produtividade agrícola são processos essenciais para os programas operacionais, pois subsidiam a formulação de políticas públicas, além de auxiliar na tomada de decisão quanto ao transporte, armazenamento e comercialização do produto. A presente pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial do modelo agrometeorológico-espectral, imagens NDVI do sensor MODIS e dados do modelo regional ETA para estimar a produtividade do trigo na região de Francisco Beltrão no ano safra 2011. A estimativa de área foi realizada com a utilização de imagens TM/Landsat de oito datas coletadas ao longo do ciclo fenológico da cultura e auxiliados por informações dos Relatórios de Acompanhamento da situação de plantio/colheita fornecidos pelo SEAB. A partir do mapa de classificação das áreas tritícolas, foi gerada uma máscara de cultivo com tamanho de pixels de 250x250m (compatível com as imagens MODIS) para seleção de índices de vegetação em pixels com 100 % de ocupação com trigo. A variável Índice de Área Foliar (IAF) foi estimada através de imagens NDVI do MODIS obtidas ao longo do ciclo de crescimento do trigo. Em nível regional a diferença relativa entre a produtividade estimada pelo modelo e os dados fornecidos pelo DERAL foi de 4,41%. A estimativa da produtividade para região apresentou diferença relativa menor, em comparação com a estimativa a nível municipal. Os resultados obtidos na estimativa da produtividade foram satisfatórios e expressam o potencial do emprego do modelo agrometeorológico-espectral no acompanhamento de safra da cultura tritícola.

APPLICATION OF A SPECTRO-AGRO-METEOROLOGICAL MODEL AND THE METEREOROLOGICAL VARIABLES OF THE REGIONAL MODEL ETA FOR ESTIMATING WHEAT YIELD

ABSTRACT

Accurate and timely monitoring of the state of agricultural crops and harvest estimates are essential processes for operational programs, as they assist in the formation of public policies and in decision-making regarding the transportation, storage and marketing of the product. The present research aimed to evaluate the potential of the agrometeorological-spectral model, NDVI images from the MODIS sensor, and data from the regional ETA model to estimate the productivity of wheat in the Francisco Beltrão region in the crop year 2011. The estimation of area was performed using TM/Landsat images for eight dates collected along the phenological cycle of the crop, and was aided by information regarding the planting/harvest situation found in the Monitoring Reports provided by SEAB. From the classification map of the wheat-growing areas, we generated a mask of cultivation with a pixel size of 250x250m (compatible with MODIS images) for selection of vegetation indices in pixels with 100% occupation by wheat. The variable Leaf Area Index (IAF) was estimated through MODIS NDVI images obtained throughout the wheat life cycle. At the regional level, the relative difference between the productivity estimated by the model and the data provided by DERAL was 4.41%. The estimation of productivity for the region presented minor relative difference compared to the estimate at the municipal level. The results of the estimation of productivity were satisfactory; they express the potential of the agrometeorological-spectral model in monitoring the wheat crop harvest.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Quantidade de trigo produzida nos principais países produtores.	5
Figura 2.2 – Quantidade produzida de trigo no Brasil.	6
Figura 2.3 - Fases fenológicas do trigo	10
Figura 3.1 - Localização da área de estudo	25
Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia utilizada para a estimativa de produtividade agrícola	27
Figura 3.3 - Fluxograma de processamento para elaboração do mapa temático de trigo.....	29
Figura 3.4 - A área cultivada com trigo em função das fases fenológicas	33
Figura 4.1 - Caracterização do padrão espectral de lavouras tritícolas na composição colorida RGB (453) do TM/Landsat-5 (07/08/2011)	53
Figura 4. 2 - Árvore de decisão empregada na classificação das áreas de trigo.....	54
Figura 4.3 – Mapa temático com a distribuição espacial das áreas tritícolas – Núcleo Regional de Francisco Beltrão – Ano Safra 2011	55
Figura 4.4 – Temperatura média, máxima e mínima do ar (°C) e precipitação média (mm) no período de estudo.	57
Figura 4.5 – Radiação Solar Incidente média ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) no período de estudo	58
Figura 4.6 - Comportamento dos índices de vegetação (a) NDVI e (b) EVI – no Núcleo Regional de Francisco Beltrão, Ano Safra 2011	59
Figura 4.7 – Comportamento do Índice de Área Foliar no Núcleo Regional de Francisco Beltrão, Ano Safra 2011	60
Figura 4.8 – Variáveis meteorológicas médias da área de estudo: (a) Temperatura média (°C), (b) Temperatura Máxima, (c) Temperatura Mínima (°C), (d) Precipitação acumulada (mm) e (e) Radiação Incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), Radiação Externa (R_{ext} , $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e Radiação máxima de dia claro (R_{so} , $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011	63
Figura 4.9 - Valores médios das variáveis meteorológicas e índice de área foliar ocorridos durante o ciclo fenológico da cultura – (a) Radiação Incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e IAF e (b) Temperatura média (C°) e IAF no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no ano de 2011.	66
Figura 4.10 – Produtividade média acumulada do trigo estimada por meio do modelo agrometeorológico-espectral no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011	67
Figura 4.11 - Produtividade estimada pelos modelos agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL a nível municipal	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Área (1.000 ha), rendimento (ton/ha), produção (1.000 ton) e consumo (1.000 ton) de trigo de países que compõe o Mercosul e países associados.	8
Tabela 2.2 – Escala de Feekes e Large para caracterização de estádios de desenvolvimento do trigo.	11
Tabela 2.3 – Índices de vegetação	21
Tabela 3.1 – Dados e procedimentos empregados na pesquisa.....	28
Tabela 3.2 - Resumo de variáveis e parâmetros utilizados na segmentação.	30
Tabela 3.3 - Resumo das informações contidas no conjunto de treinamento	31
Tabela 3.4 – Informações da série temporal do ano safra 2011	32
Tabela 3.5 – Mosaicos do Produto MOD13Q1 do sensor MODIS/TERRA e respectivos períodos correspondentes	34
Tabela 3.6 – Localização das Estações Meteorológicas.....	36
Tabela 3.7 – Variação nos valores de radiação com base nos valores estimados pelo modelo regional ETA.....	38
Tabela 3.8 - Relação entre o índice de área foliar da cultura e o fator de compensação de crescimento	40
Tabela 3.9 - Taxa de produção de matéria seca (t_m) para cultura do trigo em função da temperatura média do ar (t_{med}).....	42
Tabela 3.10 – Taxa de produção de matéria seca em dias claros (t_c) e em dias nublados (t_n) ao longo da estação de crescimento do trigo no núcleo regional de Francisco Beltrão	43
Tabela 3.11 – Valores do Fator de resposta da produção (ky), coeficiente da cultura (kc) e profundidade efetiva de raiz (D) por período	47
Tabela 3.12 - Fator de disponibilidade de água no solo (f) para o grupo do trigo	48
Tabela 3.13 - Classe Pedológica do solo e capacidade de armazenamento de água	49
Tabela 3.14 – Relação entre evapotranspiração real (ET_r), índice de água disponível no solo ($IADS$), água remanescente no solo (ARS) e evapotranspiração máxima (ET_m).	50
Tabela 4.1 - Área Cultivada com a Cultura do Trigo obtida por meio das imagens TM/Landsat-5, DERAL, diferença relativa (em ha) e em porcentagem (%), ano safra 2011.....	56
Tabela 4.2 - Análise dos dados de temperatura média ($^{\circ}C$), temperatura máxima ($^{\circ}C$), temperatura mínima ($^{\circ}C$), precipitação (mm) e radiação incidente na superfície ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) obtidos pelo modelo ETA durante o período de cultivo de trigo, no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no ano de 2011.	64
Tabela 4.3 - Produtividade estimada pelos modelos agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011.....	66
Tabela 4.4 - Produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL a nível municipal no Núcleo Regional de Francisco Beltrão para o Ano Safra 2011	68
Tabela 4.5 – Relação entre o decréscimo da radiação e os dados de referência	71
Tabela 4.6 - Produtividade estimada comparado com os dados do DERAL	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo Geral.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. A cultura do trigo	5
2.1.1. Fenologia do trigo	8
2.1.2. Ecofisiologia do trigo	12
2.2. Modelos de Produtividade	15
2.2.1. Modelos Agrometeorológicos	16
2.2.2. Modelo Agrometeorológico-Espectral	18
2.3. Índices de Vegetação	19
2.4. Dados Orbitais	22
2.4.1. Satélites Landsat.....	22
2.4.2 - Sensor MODIS.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1. Área de estudo	25
3.2. Metodologia	26
3.3 Mapa temático com a distribuição espacial das lavouras de trigo	29
3.3.1 Análise de Imagem Orientada a Objetos.....	30
3.4 Análise do comportamento espectral da vegetação	34
3.5 Variáveis meteorológicas.....	35
3.5.1 Dados Modelo ETA	35
3.5.2 Dados de Estação Meteorológica	36
3.6 Análise comparativa entre os dados do Modelo Regional ETA e os dados de estações meteorológicas.....	36
3.7 Verificação da influência da radiação solar incidente o Modelo de Produtividade	37
3.8 Modelo Agrometeorológico – Espectral.....	38
3.8.1 Determinação da produtividade potencial (Yp)	39

3.8.2 Determinação da evapotranspiração.....	43
3.9 Análise estatística dos dados de produtividade.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1. Mapeamento das áreas de trigo.....	53
4.2. Comportamento das variáveis meteorológicas	56
4.3. Comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI	58
4.5. Análise estatística dos dados do Modelo Regional ETA	61
4.6 Estimativa da produtividade em nível Regional	65
4.6.1. Estimativa da produtividade em nível Municipal	67
4.7. Análise da influência da radiação solar incidente sobre a estimativa de produtividade	70
5. CONCLUSÕES	73
6. RECOMENDAÇÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

No Brasil o consumo de trigo é de aproximadamente 11 milhões de toneladas e o país produz somente 50% desta quantidade consumida (CUNHA *et al.*, 2011). Os maiores Estados produtores do grão são o Paraná (49,1%) e o Rio Grande do Sul (42,2%). Em menor porcentagem (8,7% no total) o cereal também é cultivado em Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal (IBGE, 2013).

Segundo Cunha (2007), frente às projeções de aumento da população mundial, um desafio para a agricultura é suprir a demanda mundial de alimento. De acordo com o mesmo autor, com o aumento da população e melhoria nas condições de vida o trigo deve ser consumido em maior escala.

O trigo, planta de ciclo anual, é cultivada nas estações de inverno e primavera. O grão é consumido na forma de alimento (pão, massa alimentícia, bolo e biscoito), entretanto, quando não atinge a qualidade exigida para consumo humano é utilizado como ração animal (EMBRAPA, 2014).

Dada a grande dependência da importação do trigo, fica evidente a importância de se ter um conhecimento prévio do quanto será a sua produção para um dado ano safra. Em outras palavras, a avaliação precoce de reduções de rendimento poderiam evitar uma situação desastrosa e, ao mesmo tempo, ajudar no planejamento estratégico para atender as demandas de consumo (DORAISWAMY *et al.*, 2004).

O monitoramento preciso e oportuno do estado das culturas agrícolas e a estimativa da produção são processos essenciais para os programas operacionais. As flutuações na produção agrícola são difíceis de ser quantificadas em grandes áreas. Todavia, o sensoriamento remoto permite obter dados sobre áreas extensas, o que viabiliza o emprego de modelos de produtividade que utilizam parâmetros agrônômicos em sua construção e que podem ser estimados a partir da energia refletida pela cultura (RUDORFF; BATISTA, 1989).

Rudorff e Batista (1989) comentaram que a utilização de dados de sensoriamento remoto permite obter informações de área cultivada e viabiliza o emprego de modelo de produtividade de culturas de forma espacializada. Pino (2001) corrobora com os autores ao afirmar que os métodos convencionais (subjetivos) de estimativa de safra devem ser aprimorados de maneira a incluir tecnologias como o Sensoriamento Remoto e o Sistema de Informação Geográfica (SIG).

No estudo da eficiência agrícola é possível relacionar a estimativa da produtividade máxima com a produtividade real da cultura utilizando modelos agrometeorológicos (MARIN, 2005). Porém, o componente agrometeorológico representa as condições ambientais, enquanto as características do cultivo são expressas pela componente espectral (RUDORFF; BATISTA, 1989).

Como hipótese do trabalho, acredita-se que a produtividade do trigo pode ser espacialmente estimada, por meio da associação de dados meteorológicos e componente espectral no modelo agrometeorológico-espectral.

1.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa teve com objetivo avaliar o desempenho do modelo agrometeorológico-espectral, dados do modelo regional ETA e o produto de índice de vegetação MODIS, para estimar a produtividade do trigo na região de Francisco Beltrão, para o ano safra 2011.

1.2. Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral fosse alcançado alguns objetivos específicos foram determinados:

- Mapear as áreas de cultivo de trigo para o ano de 2011 utilizando imagens do ETM+/Landsat-7 e TM/Landsat-5;
- Avaliar a sensibilidade dos índices de vegetação NDVI e EVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, em diferentes estádios fenológicos da cultura;

- Análise comparativa entre variáveis meteorológicas (radiação solar incidente, temperatura e precipitação) fornecidas pelo Modelo ETA/CPTEC e dados provenientes de Estações Meteorológicas;
- Análise da influência da variável meteorológica radiação solar incidente gerada pelo modelo ETA/CPTEC sobre o modelo agrometeorológico-espectral.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A cultura do trigo

O trigo é uma gramínea do gênero *Triticum* e está entre as plantas mais cultivadas no mundo. A triticultura corresponde à cerca de 30% da produção mundial de grãos, é o segundo cereal, após o milho, mais produzido no mundo, com significativo peso na economia agrícola global (MAPA, 2012). O cereal é empregado na alimentação humana, na elaboração de produtos não alimentícios e na alimentação animal. Estima-se que no Brasil aproximadamente 94,5% da produção de trigo é destinada ao processamento industrial, enquanto 2,5% é utilizada como reserva de semente e 3% utilizado na alimentação animal (MORI; IGNACZAK, 2011).

O trigo é uma gramínea anual, adaptada a temperaturas mais frias. Por esta razão, na Europa, o seu cultivo se expandiu nas regiões mais frias, como a Rússia e a Polônia (USDA, 2010). A produção mundial do trigo concentra-se no hemisfério Norte, especialmente nos continentes europeu e asiático. A União Europeia, a China, a Índia, os EUA e a Rússia são responsáveis por 60% da produção global de trigo (Figura 2.1). A produção brasileira é de cerca de 5,0 milhões de toneladas e representa aproximadamente 0,8% da produção mundial (MORI; IGNACZAK, 2011; USDA, 2014). No Brasil, o trigo é cultivado nas regiões Sul (RS, SC e PR), Sudeste (MG e SP) e Centro-Oeste (MS, GO e DF) (MAPA, 2012). A produção de trigo em grãos concentra-se no Sul do País, principalmente nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul (IBGE, 2014).

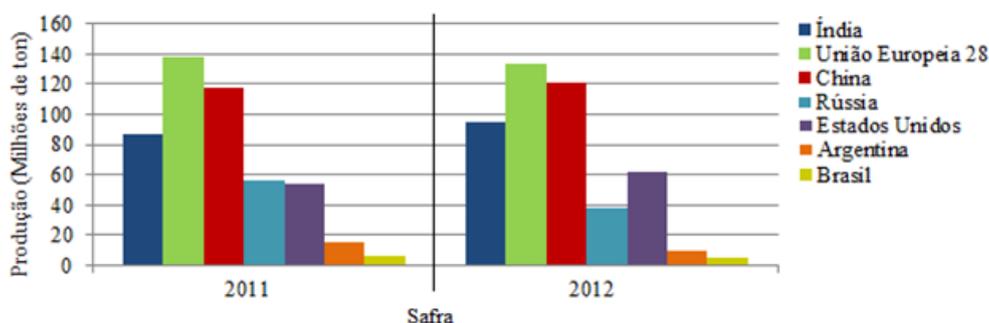


Figura 2.1 - Quantidade de trigo produzida nos principais países produtores.

Fonte: USDA (2014).

Até a década de 70, cerca de 90% do trigo brasileiro era produzido no Rio Grande do Sul, porém, ao longo da década de 80, com a expansão da triticultura para outros estados, o Paraná passou a ser o maior produtor do cereal (IGNACZAK *et al.*, 2006).

No Estado do Paraná, a expansão da triticultura acompanhou o aumento de recursos para a pesquisa agrícola, resultando nos aumentos tanto de área plantada, quanto de produtividade do trigo. No período de 1970 a 1984, a produtividade média do trigo no país era de 1.139 kg/ha, no período de 1995 a 2003, a produtividade média do trigo era de aproximadamente 1.500 kg/ha. Atualmente, a produtividade média situa-se em torno de 2500 kg/ha. A partir da década de 90, o cultivo do trigo sob irrigação desenvolveu-se nos estados de Minas Gerais e Goiás e, nessas condições, alcançou produtividades superiores a 4.500 kg/ha e a participação das regiões Centro-Oeste e Sudeste na produção nacional passou a ser de 2,9% (IGNACZAK *et al.*, 2006).

A Figura 2.2 apresenta os dados de quantidade produzida de trigo no Brasil para os anos safra 2010, 2011 e 2012. Em 2012, a produção brasileira foi de 4,42 milhões de toneladas, com redução de aproximadamente 22% em comparação ao ano safra de 2011. Esta redução foi devido a ocorrência de geadas nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O Paraná, embora com uma redução de 23% de área em relação ao ano anterior, obteve rendimento de 2.700 kg/ha e produção de 2,1 milhões de toneladas.

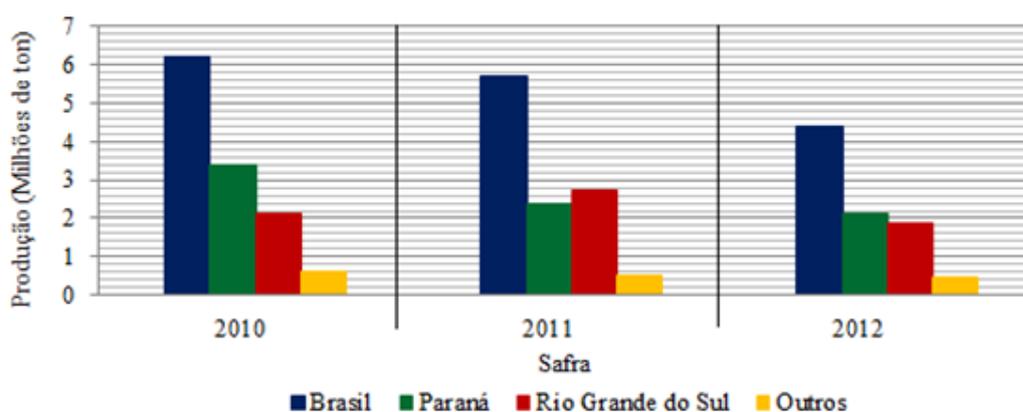


Figura 2.2 – Quantidade produzida de trigo no Brasil.

Fonte: IBGE (2014).

Tanto a qualidade quanto o rendimento dos grãos podem ser afetados pelas condições climáticas à que estão sujeitas as culturas agrícolas. O número de espigas por planta, número de espiguetas por espiga, número de grãos por espiga e por espiguetas e peso médio do grão são os componentes do rendimento de grãos no trigo (PIRES *et al.*, 2011). Nas regiões subtropicais os principais riscos de perda de rendimento estão relacionados ao excesso de chuva e ocorrência de geadas. Nas regiões tropicais, os riscos relacionam-se com a umidade relativa e à temperatura do ar elevadas (EMBRAPA TRIGO, 2014).

A adaptação do trigo para as condições de clima e de solo para uma região é realizada pela soma de fatores genéticos e culturais, com o aprimoramento de tecnologias (por exemplo, controle de pragas, manejo do solo e rotação de culturas) que dão suporte à produção agrícola há diminuição dos riscos de perdas. Porém, mesmo com o aumento do potencial produtivo e a diminuição dos riscos de perdas tem-se observado uma diminuição da área tritícola devido, principalmente, aos altos custos de produção (EMBRAPA SOJA, 2014).

No Brasil, o rendimento de grãos é pequeno se comparado às médias mundiais, os rendimentos oscilam entre safras e entre regiões, em decorrência das variações das condições climáticas do País e dos diferentes sistemas de cultivo empregados (MORI; IGNACZAK, 2011). O sistema de plantio do trigo no Brasil ainda predomina o sequeiro, embora o cultivo irrigado seja importante nos estados da região Centro-Oeste.

Na Tabela 2.1 é mostrado a relação da área plantada (mil ha), o rendimento (kg/ha), a produção (mil t) e o consumo (mil t) de trigo, para os países do Mercosul e associados, como a Bolívia e o Chile (EMBRAPA TRIGO, 2014).

Tabela 2.1 – Área (1.000 ha), rendimento (ton/ha), produção (1.000 ton) e consumo (1.000 ton) de trigo de países que compõe o Mercosul e países associados.

Safra	Argentina	Bolívia	Brasil	Chile	Paraguai	Uruguai	Venezuela
Área (mil ha)							
2011/12	5.170	110	2.170	229	500	500	-
2012/13	3.600	115	1.900	238	500	440	-
2013/14	3.500	114	2.200	250	400	550	-
Rendimento (kg/ha)							
2011/12	2.998	1.073	2.673	4.865	2.480	3.500	-
2012/13	2.639	1.043	2.305	5.735	2.600	3.580	-
2013/14	3.000	1.044	2.159	5.200	2.500	3.500	-
Produção (mil ton)							
2011/12	15.500	118	5.800	1.114	1.240	1.750	-
2012/13	9.500	120	4.380	1.365	1.300	1.575	-
2013/14	10.500	119	4.750	1.300	1.000	1.925	-
Consumo (mil ton)							
2011/12	5.950	465	11.200	2.310	475	345	1.500
2012/13	6.100	490	10.900	2.300	475	550	1.550
2013/14	6.050	490	11.400	2.350	680	460	1.585

2.1.1. Fenologia do trigo

A Fenologia estuda os fenômenos biológicos periódicos (brotação, floração, maturação, por exemplo) relacionados com o clima e alterações sazonais a que se encontram submetidas as plantas. Seu conhecimento permite prever a resposta da cultura a um microclima específico (AGUSTI *et al.*, 1995).

Na Figura 2.3 é mostrada a escala de desenvolvimento do trigo segundo Large (1954). Na Tabela 2.2 são descritos os fenômenos pertencentes a cada fase de desenvolvimento do trigo segundo Escala de Feekes e Large.

Segundo Pires *et al.* (2011), o ciclo do trigo pode ser dividido em fase vegetativa, fase reprodutiva e enchimento de grãos. A fase vegetativa compreende o estágio de perfilhamento. Nessa fase são diferenciados os primórdios foliares, além disso, o coleóptilo cresce até atingir a superfície do solo, momento em que se define o

subperíodo semeadura-emergência. O afilhamento inicia-se com o aparecimento dos afilhos no interior das bainhas foliares, até o início do alongamento, quando a competição por recursos inibe a formação de novos afilhos de ordem superior.

Em seguida, a fase reprodutiva compreende os estádios de crescimento do colmo, espigamento e florescimento. Inicia-se com a diferenciação dos primórdios de espiguetas, na porção central a espiga, estendendo-se, depois, para as extremidades e culminando com o aparecimento da espiguetas terminal na ponta (estádio de duplo anel) (PIRES *et al.*, 2011). De acordo com Rodrigues *et al.* (2011), o estágio de duplo anel caracteriza o final da fase vegetativa, dando início a fase reprodutiva.

O crescimento da espiga e a formação de primórdios foliares ocorre simultaneamente com a alongação (quando a planta assume porte ereto), estendendo-se até a floração (antese), quando o colmo finaliza o seu alongamento. Posterior à floração ocorre a fase de enchimento dos grãos (PIRES *et al.*, 2011). Das fases de vegetativa a reprodutiva, são observadas a expansão da área foliar da cultura.

A fase de enchimento de grãos estende-se até a maturação fisiológica, sendo a etapa na qual a senescência foliar é acelerada. Nessa fase, o grão atinge o máximo acúmulo de matéria seca. Inicia-se com a intensa multiplicação celular para formação do endosperma, em seguida, ocorre a etapa de enchimento efetivo, com as fases de grão leitoso, grão pastoso, grão duro e por fim, grão maduro (PIRES *et al.*, 2011).

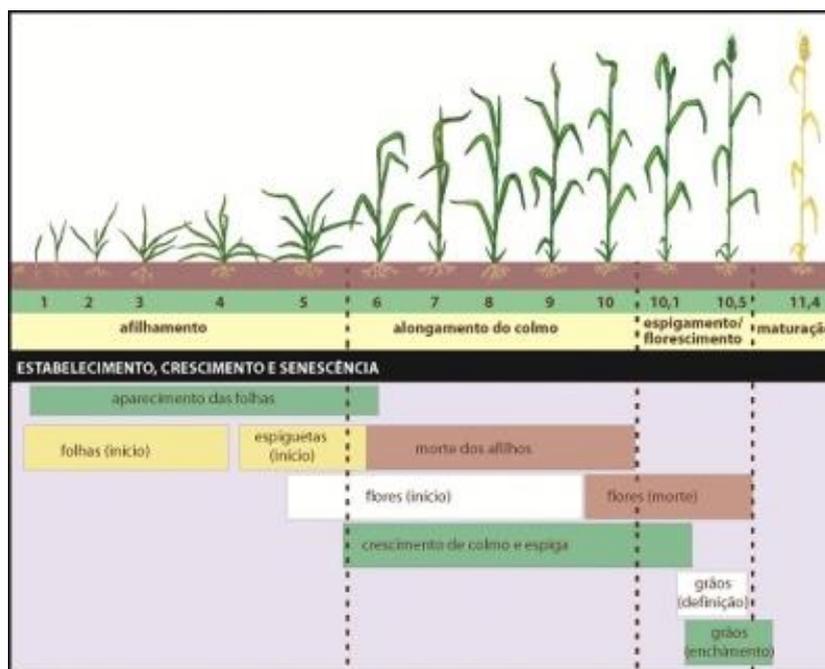


Figura 2.3 - Fases fenológicas do trigo

Fonte: PIRES *et al.* (2011)

Baseado na escala de Feekes e Large, o Instituto Agronômico do Paraná define os estádios fenológicos do trigo e sua duração média conforme descrito a seguir:

- **Emergência ao início do perfilhamento:** Compreende os estádios de desenvolvimento de 0 a 2 e tem duração média de 10 dias.
- **Perfilhamento:** Essa fase compreende o estágio 3 e inicia-se a partir dos 11 a 24 dias após o plantio.
- **Início da alongação ao final do emborrachamento:** essa fase tem início a partir dos 25 a 47 dias após a sementeira e compreende os estádios de 4 a 10.
- **Início do espigamento ao final do florescimento:** tem início dos 48 a 63 dias após a sementeira e compreende os estádios de 10.1 a 10.5.4.
- **Enchimento de grãos:** tem início dos 64 a 98 dias e compreende o estágio 11.1.
- **Grãos em massa ou início de maturação:** inicia-se dos 99 a 115 dias após o plantio e compreende os estádios 11.2 a 11.4.

Tabela 2.2 – Escala de Feekes e Large para caracterização de estádios de desenvolvimento do trigo.

Estádio	Característica
PERFILHAMENTO	
1	Emergência do coleóptilo e das primeiras folhas.
2	Início do perfilhamento.
3	Perfilhos formados.
	Folhas freqüentemente torcidas, espiralizadas.
4	Início da ereção do pseudocolmo (formado pelas bainhas).
5	Pseudocolmo ereto.
CRESCIMENTO DO COLMO	
6	Primeiro nó do colmo visível.
7	Segundo nó do colmo visível.
8	Folha bandeira visível.
9	Lígula da folha bandeira visível.
10	Emborrachamento.
ESPIGAMENTO	
10.1	Primeira espiga recém-visível escapando da bainha.
10.2	1/4 do espigamento completo.
10.3	1/2 do espigamento completo.
10.4	3/4 do espigamento completo.
10.5	Todas as espigas fora da bainha.
FLORESCIMENTO	
10.5.1	Início do florescimento.
10.5.2	Florescimento até o topo da espiga.
10.5.3	Florescimento até a base da espiga.
10.5.4	Florescimento completo. Início da formação do grão.
AMADURECIMENTO	
11.1	Grão leitoso.
11.2	Conteúdo do grão macio e úmido (massa mole).
11.3	Grão duro (massa dura).
11.4	Maturação de colheita. Palha seca.

Fonte: Large (1954); Lima (2002)

O conhecimento dos estádios fisiológicos torna-se imprescindível para melhor adequação no tempo e no espaço de práticas de manejo que potencializem o rendimento e qualidade dos grãos (RODRIGUES *et al.*, 2011).

2.1.2. Ecofisiologia do trigo

As condições ambientais influenciam o desenvolvimento da cultura, afetando diretamente seu rendimento e qualidade (PIRES *et al.*, 2011). Além de influenciarem diretamente nos processos internos das plantas, as variáveis climáticas controlam a ocorrência de fenômenos favoráveis ou prejudiciais ao desenvolvimento das mesmas (BERNARDES, 2013).

A obtenção de elevados rendimentos depende do entendimento dos processos de crescimento da planta. Durante o desenvolvimento, a planta apresenta diferentes períodos de crescimento delimitado por estádios de desenvolvimento característicos. O conhecimento dos fatores externos e internos que afetam cada período durante o ciclo é importante, para que se possam maximizar os recursos ambientais para a produção do grão (RODRIGUES *et al.*, 2011).

A temperatura afeta a taxa de desenvolvimento do cultivo em todas as etapas fisiológicas, temperaturas elevadas, por exemplo, aceleram o desenvolvimento das plantas (PIRES *et al.*, 2011). Segundo Rodrigues *et al.* (2011), os principais componentes que afetam o desenvolvimento da cultura são temperatura e fotoperíodo.

Para altos rendimentos são necessários 450 mm a 650 mm de água, dependendo do clima e da duração do período de crescimento (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Invernos suaves, sem chuvas fortes, com suprimento de água suficiente são favoráveis ao desenvolvimento (CASTRO *et al.*, 1999).

Na região Sul, os principais problemas climáticos da triticultura são o excesso de umidade relativa do ar em setembro-outubro (época de maturação e colheita), a ocorrência de geadas no espigamento e déficit hídrico no florescimento (DALMAGO, 2009).

O sistema radicular das plantas terrestres desempenha as funções primárias de sustentação e absorção de água e nutrientes. A distribuição do sistema radicular depende, entre outros fatores, da espécie, do tipo de solo, da umidade, da nutrição e da

densidade de plantio (FACHINELLO *et al.*, 1996). O trigo apresenta sistema radicular constituído de raízes seminais (originada diretamente da semente) e raízes adventícias (originada do caule). A cultura produz grande quantidade de raízes, no entanto, essa quantidade é diretamente dependente do tipo de solo, da acidez, da temperatura e da disponibilidade de água. Para o cultivo, o pH ideal está entre 6,2 e 6,8, além disso, solos de textura média são indicados para o bom desenvolvimento da parte aérea e radicular da cultura (MARTINS, 2008).

A germinação das sementes ocorre entre 4 e 37°C, porém a temperatura ideal está situada entre 20 e 25°C. Na etapa de germinação e de emergência a umidade mínima do solo necessária está na faixa de 35-45%. A energia utilizada no início do desenvolvimento do embrião é retirada do endosperma até o aparecimento da primeira folha verde, portanto, a luz e as condições nutricionais não são preponderantes nesse processo (MARTINS, 2008; RODRIGUES *et al.*, 2011).

O crescimento da cultura é retardado em temperaturas menores do que 15°C e aceleradas acima de 20°C. No início do ciclo temperaturas entre 20 e 25°C podem acelerar o crescimento, e conseqüentemente, afetar positivamente o rendimento da cultura, entretanto, temperaturas maiores do que 25 °C podem reduzir a produção de grão (MARTINS, 2008).

Durante o afilhamento, tanto as características genéticas quanto o ambiente influenciam a produção dos afilhos. A baixa temperatura do ar proporciona uma emissão de elevado número de afilhos. O desenvolvimento vegetativo nesta etapa também é influenciada pela disponibilidade hídrica, características nutricionais e físicas do solo que favorecem seu crescimento (RODRIGUES *et al.*, 2011).

No estágio de espiguetas terminal, quando as espiguetas estão iniciadas e o colmo começa sua alongação, o ambiente não influencia o número de espiguetas, mas sim a quantidade de flores que se diferenciam em cada espiguetas (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Segundo Wardlaw e Moncur (1995), o aumento da temperatura na antese provoca redução no número de grãos por espiga na maturidade e, conseqüentemente, reduz o rendimento dos grãos.

A fase de fecundação é sensível às baixas temperaturas, pois pode provocar morte de flores e pólen, necrose no pedúnculo e morte da espiga (RODRIGUES *et al.*, 2011).

No sul do País, destaca-se a preocupação com a ocorrência de geada na floração (antese) que causa a queima de folhas, o estrangulamento de colmos e, se atingir os primórdios florais, impede a formação de grãos. Além disso, há a preocupação com o excesso de chuva na colheita e maturação que pode afetar negativamente o rendimento e as características de qualidade dos grãos (CUNHA *et al.*, 2001).

A altitude influencia a temperatura do ar, que normalmente decresce com a elevação da altitude numa proporção de aproximadamente 1 °C para cada 100 m de elevação. A temperatura do ar afeta direta e significativamente os processos fisiológicos das plantas (FRITZSONS *et al.*, 2008). Na triticultura, são observados maiores rendimentos em regiões de maior altitude (fria e úmida), pois apresentam favoráveis condições de radiação solar e temperatura (quociente fototermal) no período da antese (CUNHA *et al.*, 2006).

O trigo é uma planta de dia longo, portanto, necessita de períodos longos de luz para florescer. Alta intensidade de luz combinada com altos teores de nitrogênio fornece maior número de espigas (MARTINS, 2008). Em experimento conduzido em casa de vegetação, Screeren *et al.* (1995) observaram que o excesso de água no solo provoca redução no peso seco e nas ramificações de raízes. Já a baixa disponibilidade luminosa provoca redução no peso seco da parte aérea das plântulas de trigo. No estudo em campo, os mesmos autores, observaram que plantas submetidas ao sombreamento atrasaram a maturação em 3 dias, apresentaram uma quantidade maior de espiguetas estéreis e redução no peso de grãos por planta.

Ainda de acordo com Rodrigues *et al.* (2010), o excesso de chuvas e variação de temperatura nos estádios mais avançados do desenvolvimento de grãos causam a

chamada “germinação na espiga”, que é a quebra de dormência das sementes e o desencadeamento do processo de germinação em pré-colheita. Esse processo afeta diretamente o rendimento e a qualidade industrial do grão (IAPAR, 2013).

A longevidade do trigo é baixa, sendo influenciada pelas condições ambientais. Após a máxima expansão foliar, a taxa de fotossíntese diminui com aumento da idade e a senescência das folhas (CASTRO; KLUGE, 1999). Na senescência, a exportação de assimilados das folhas maduras para as novas diminui até cessar (CASTRO; KLUGE, 1999).

2.2. Modelos de Produtividade

A estimativa de safra é imprescindível para o planejamento estratégico do País, pois é um importante subsídio para a formulação de políticas públicas, o abastecimento e a segurança alimentar da população e a formação de preços nos mercados interno e externo. No âmbito da iniciativa privada, a estimativa de safra auxilia nas tomadas de decisão quanto ao armazenamento, estoques, transporte, industrialização e comercialização do produto (FIGUEIREDO, 2007). Atualmente no Brasil, a estimativa das áreas cultivadas tem sido realizada de maneira subjetiva através de entrevistas com agricultores ou entidades relacionadas ao setor agrícola (IBGE, 2003).

Adversidades climáticas podem causar impactos sociais e prejuízos econômicos de difícil quantificação. O estudo da relação entre o clima e a produtividade intenciona explicar as influências do efeito do clima na área, fornecendo subsídios ao planejamento agrícola (CORAL *et al.*, 2005). Segundo Camargo *et al.* (1986), as relações entre os elementos climáticos e a produção agrícola são complexas, pois o desenvolvimento e o crescimento da cultura podem ser afetados pelos fatores ambientais.

Neste contexto, tem-se desenvolvido modelos que procuram expressar os efeitos das variações climáticas sobre o crescimento de culturas e, conseqüentemente, sobre a produtividade agrícola. Bernardes (2013) salienta que os modelos de produtividade buscam integrar matematicamente a relação dos fatores biológicos e ambientais para explicar uma dada produtividade.

Assim, avaliar a influência das variáveis climáticas no desenvolvimento e na produtividade de culturas agrícolas pode ser feito desde as correlações mais simples até modelos matemáticos mais complexos, nos quais diferentes parâmetros são considerados. Segundo Baier (1979), os modelos de produtividade podem ser classificados em modelos de simulação de crescimento, modelos estatísticos empíricos e modelos de análise entre a relação planta-clima. Nos modelos de simulação de crescimento de culturas, considera-se que o impacto das variáveis meteorológicas sobre os processos específicos da cultura (por exemplo, fotossíntese, transpiração ou a respiração) pode ser simulado por meio de um conjunto de equações matemáticas baseadas em experiências ou conhecimentos disponíveis sobre um processo particular.

Segundo o autor, em modelos de análise entre a relação planta-clima, objetiva explicar com base nos processos físicos e/ou fisiológicos o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas no crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura. Já os modelos estatísticos empíricos, que são construídos a partir de séries históricas de dados de rendimento e de dados meteorológicos de uma determinada região, consistem em relacionar amostras de dados de produtividade de uma área e variáveis meteorológicas da mesma área através de técnicas de regressão estatística. A validade e a potencialidade do modelo dependem da representatividade dos dados de entrada, da seleção de variáveis e da concepção do modelo.

Tendo em vista que as condições meteorológicas constituem um dos principais fatores que condicionam o desenvolvimento e a produção agrícola, a informação agrometeorológica é de suma importância para o planejamento das atividades agrícolas (IPMA, 2012). Para Dallacort *et al.* (2006), os modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade mais importantes são os que simulam as fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, a disponibilidade de umidade no solo e os efeitos do estresse hídrico no rendimento da cultura.

2.2.1. Modelos Agrometeorológicos

De acordo com Moraes *et al.* (1998), são complexas as relações entre os fatores meteorológicos e a produção agrícola, pois o crescimento e desenvolvimento fenológico

da cultura podem ser afetados pelo ambiente. Ainda segundo os autores, os modelos agrometeorológicos relacionados com crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas fornecem dados que permitem realizar o monitoramento e previsão de safras. Além disso, com o uso dos modelos agrometeorológicos é possível identificar o estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura e, conseqüentemente, seu impacto na produtividade real (DOORENBOS; KASSAM, 1979; RUDORFF; BATISTA, 1990). Neste sentido, modelos agrometeorológicos são desenvolvidos para serem aplicados em diversas culturas com ênfase na relação planta-clima.

Jensen (1968) sugeriu um modelo de produtividade no qual considera que a penalização da produtividade potencial da cultura é dada pelo o produtório da relação entre evapotranspiração real (ET_r) e evapotranspiração potencial (ET_p) por estágio fenológico, pois essa relação indica se o suprimento hídrico para a planta é satisfatório ou não. Quando essa relação for menor do que 1 há penalização por estresse hídrico e, conseqüentemente, redução da produção final.

Doorenbos e Kassam (1979) desenvolveram um modelo agrometeorológico para estimar a produtividade de culturas agrícolas, que se baseia na penalização da produtividade máxima em função da disponibilidade de água no solo, dada pela relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração máxima (ET_m). Portanto, a produtividade real pode ser obtida penalizando-se a produtividade potencial em função do déficit de água.

No Brasil não existem sistemas objetivos de previsão de safra em escala operacional, entretanto, estudos têm sido realizados e modelos agrometeorológicos têm sido empregados na estimativa de produtividade de culturas agrícolas, tais como para a cultura da soja (MORAES *et al.*, 1998; FONTANA *et al.*, 2001), para o café (PICINI *et al.*, 1999; CAMARGO, 1999; SANTOS; CAMARGO, 2006), para a cultura da laranja (CAMARGO *et al.*, 1999; MARTINS *et al.*, 2006) e para a cultura do trigo (RUDORFF; BATISTA, 1989).

Dentro desse contexto, estudos foram feitos com o intuito de incorporar a componente espectral ao modelo agrometeorológico proposto por Doorenbos e Kassam (1979) que se baseia na penalização da produtividade máxima em função da disponibilidade de água no solo.

2.2.2. Modelo Agrometeorológico-Espectral

De acordo com Rudorff (1984), agregar as informações contidas nos índices de vegetação, obtidos a partir de imagens de satélites, aos dados de produtividade estimada por modelos agrometeorológicos podem melhorar os resultados das estimativas.

Utilizando NDVI derivado das bandas 1 e 2 do sensor AVHRR/NOAA, Doraiswamy e Cook (1995) estimaram a produtividade do trigo de primavera. Em um estudo realizado em Dakota do Norte, os autores demonstraram que os valores de NDVI para a cultura durante o período de enchimento de grãos, melhoraram as estimativas de rendimento potenciais. Os mesmos autores ressaltaram, porém, que a resolução espacial de 1 km é um fator limitante na recuperação, com precisão, de parâmetros biofísicos específicos da cultura em campo e que a alta produtividade está associada à alta cobertura vegetal, entretanto, não se pode afirmar que a baixa produtividade esteja associada com a baixa cobertura vegetal.

Os diversos elementos meteorológicos e fatores culturais que afetam a produtividade são observados indiretamente no índice vegetativo e expressam as condições de crescimento e desenvolvimento da cultura e, em última análise refletem sua produtividade (RUDORFF; BATISTA, 1989).

Com base na relação entre informações provenientes de sensoriamento remoto e variáveis meteorológicas, foram desenvolvidos estudos para a adaptação da componente espectral ao modelo agrometeorológico proposto por Doorenbos e Kassam (1979).

Rudorff e Batista (1989) utilizaram o modelo agrometeorológico para estimar a produtividade do trigo em nível de propriedade agrícola para os anos safra de 86 e 87, na região de Assis-SP. Os autores observaram que no período de emborrachamento do

trigo houve alta relação da produtividade estimada com a observada, cujos coeficientes de correlação foram de 0,80 para a safra de 86 e 0,67 para ano safra de 1987.

Rizzi (2004) utilizou o mesmo modelo agroeteorológico-espectral para estimativa da produção da cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul. O autor, no entanto, introduziu ao modelo informações do produto NDVI, gerado a partir de imagens MODIS, para estimar o IAF. Segundo o autor, foi possível monitorar temporal e espacialmente a evolução da produtividade durante todo o ciclo da cultura.

A mesma abordagem foi utilizada por Rosa (2007) na estimativa da produtividade da cultura de café na Mesorregião Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais. De acordo com a autora, o modelo agrometeorológico espectral mostrou-se satisfatório para obter a estimativa da produtividade do café em escala regional.

2.3. Índices de Vegetação

As folhas, como estrutura fotossintetizante, têm grande importância na interação do fluxo radiante com a vegetação (VALERIANO, 1992). Na vegetação, o fluxo radiante direto ou difuso proveniente do Sol é interceptado pelas folhas. Essa energia ou radiação eletromagnética interceptada pelas folhas pode ser absorvida, transmitida ou refletida por elas. Além dessas três frações decorrentes do fracionamento da energia incidente tem-se também outra fração originada de emissão da radiação pela vegetação. A energia refletida e emitida quanto registrada pelos sensores fornece dados passíveis de interpretação sobre propriedades dos alvos (JENSEN, 2011).

À nível de dossel, com o acréscimo de camadas de folhas, há um aumento da quantidade de pigmentos fotossintetizantes, o que acarreta na maior absorção da radiação do visível, ou seja, há uma diminuição da reflectância na faixa do vermelho. Entretanto, na região do infravermelho próximo, a porção de radiação que atravessa inteiramente a primeira camada e atinge as camadas posteriores pode ser refletida e transmitida novamente, aumentando a reflectância no infravermelho próximo, nessa região do espectro a reflectância aumenta com o aumento do número de camadas até um valor estável máximo denominado reflectância infinita. Na região do infravermelho

médio, há diminuição da reflectância em função do aumento da oferta de água no conjunto (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Utilizando radiômetro de alta resolução espectral para estudo de monitoramento do crescimento de dosséis de trigo em diferentes fases vegetativas de quatro cultivares diferentes, BARET *et al.* (1987) observaram que o comportamento geral dos espectros independe da cultivar e data de plantio, mas é fortemente dependente da fenologia da cultura. Os autores verificam ainda que durante senescência, a reflectância do dossel aumenta no visível e diminui no infravermelho próximo.

O entendimento da reflectância foliar levou ao desenvolvimento de diferentes índices vegetativos para quantificar vários parâmetros agrônômicos, por exemplo, área foliar, cobertura vegetal, biomassa, tipo de cultura, estado nutricional e rendimento (HATFIELD *et al.*, 2008).

Os índices espectrais de vegetação podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais na forma de um índice, que podem ser relacionados com os parâmetros biofísicos da vegetação, como fitomassa, Índice de Área Foliar (IAF), percentagem de cobertura vegetal (EPIPHANIO *et al.*, 1996). Um índice de vegetação deve ser sensível á sutis variações no estado fenológico da planta, e não pode sofrer fortes influências em função de variações de tipos de solo ou geometria de iluminação e visada (HUETE, 1996). Conforme Moreira (2003), a combinação das reflectâncias espectrais em forma de índices de vegetação visa realçar a contribuição da vegetação na resposta espectral de uma superfície, procurando minimizar os efeitos externos sobre os dados espectrais. Rouse *et al.* (1974) desenvolveram o NDVI, que compreende a normalização da diferença entre os valores da reflectância no infravermelho próximo e no vermelho.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é amplamente utilizado para o acompanhamento, análise e mapeamento de distribuição temporal e espacial das características fisiológicas e biofísicos da vegetação. Entretanto, sob condições de

elevada biomassa pode haver saturação do índice, diminuindo sua eficiência (GITELSON, 2004). Além disso, o brilho do solo influencia o NDVI (HUETE, 1988).

O *Enhanced Vegetation Index* (EVI), desenvolvido como um produto de vegetação do MODIS, consiste em uma variação do NDVI, com um aprimoramento quanto a correções de influências da atmosfera e do solo. Este índice proporciona uma melhor sensibilidade em regiões elevadas de biomassa, enquanto minimiza o solo e as influências da atmosfera (JIANG *et al.*, 2008).

Na Tabela 2.3 são apresentados os índices de vegetação NDVI e EVI. Os índices representados englobam as reflectâncias na região do azul (ρ_{blue}), na região do vermelho (ρ_{red}) e infravermelho próximo (ρ_{nir}) e as constantes $G=2,5$, $L=1$, $C1=6$ e $C2=7,5$.

Tabela 2.3 - Índices de vegetação

	Nome	Fórmula	Referência
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	$\frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>	$G \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + C_1 \rho_{\text{red}} - C_2 \rho_{\text{blue}} + L}$	Huete <i>et al.</i> (1997)

O sensoriamento remoto, com a sua perspectiva sinóptica, é um potencial meio de monitoramento da vegetação terrestre. O uso de dados de sensoriamento remoto do dossel da vegetação oferece uma grande melhoria sobre as técnicas destrutivas convencionais, uma vez que permite ao pesquisador monitorar mudanças na condição das mesmas plantas ao longo do tempo (ASAR *et al.*, 1985).

A variação temporal da área foliar em uma cultura agrícola depende das condições edafoclimáticas, da cultivar e da densidade populacional, entre outros fatores. Em função da interceptação da energia incidente, fundamental ao processo fotossintético, o crescimento e desenvolvimento da planta dependem do IAF. A área foliar aumenta até

um máximo, decrescendo posteriormente, em função da senescência das folhas (MONTEIRO *et al.*, 2005).

O IAF é definido como a área foliar do dossel em relação à área de solo abaixo da copa (DORAISWAMY *et al.*, 2004). O Índice de área foliar (IAF) é uma variável-chave usada em modelagem para estimar fração do solo coberto por vegetação, previsão de crescimento da cultura e da produção (HABOUDANE *et al.*, 2004).

Existem várias técnicas para medição do Índice de Área Foliar, como medição direta por meio de método destrutivo, uso de fotografias hemisféricas ou indiretamente por meio de aparelhos (LAI-2000, por exemplo) que medem a quantidade de radiação interceptada pela superfície.

Imagens de satélites também constituem uma fonte de dados para a aplicação dos métodos indiretos e não destrutivos de estimativa do IAF. Entretanto, características próprias do cultivo, tais como estrutura vegetal, estresse hídrico, deficiências nutricionais, doenças e pragas e estágio fenológico podem ocasionar diferentes respostas espectrais. Além disso, a densidade da vegetação e sua orientação espacial exercem influência na dinâmica da reflectância de um dossel em função da variação nas geometrias de iluminação e de visada (relevo, horário de aquisição das imagens) (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

2.4. Dados Orbitais

2.4.1. Satélites Landsat

A missão do Programa Landsat foi proporcionar a aquisição repetitiva de dados multiespectrais calibrados, com resolução espectral relativamente alta pra permitir comparações do estado da superfície da Terra ao longo do tempo (NOVO, 2010). Apesar do comprovado potencial dos sensores TM/Landsat-5 e ETM/Landsat-7 no mapeamento de áreas agrícolas, esses sensores apresentam baixa resolução temporal, o que é agravado ainda pela presença de nuvens. Para anemizar este problema de baixa resolução temporal foi colocado em órbita o sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua.

2.4.2 - Sensor MODIS

O sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), fornece observações das feições atmosféricas, oceânicas e terrestres a cada um ou dois dias. Contém 36 bandas espectrais, que abrangem desde a região do visível até a região do infravermelho termal do espectro eletromagnético. Possui resoluções espaciais de 250 x 250 m (bandas 1 e 2), 500 x 500 m (bandas 3 a 7) e de 1 x 1 km (bandas 8 a 36).

O sensor MODIS tornar-se uma ferramenta útil, pois sua frequência de observação quase diária permite gerar imagens compostas em um período maior, aumentando a possibilidade de obter imagens livres de nuvens (RIZZI *et al.*, 2009), o que possibilita o monitoramento contínuo dos processos dinâmicos da vegetação, aspecto imprescindível ao acompanhamento dos estádios fenológicos das culturas. Os produtos fornecidos por este sensor como os índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) do MOD13Q1, bem como o produto MOD15A2, que contém dados do Índice de Área Foliar (IAF) e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (fAPAR), são voltados para atividade agrícola. Esses produtos são georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos, o que os torna, juntamente com sua periodicidade, interessantes para aplicações na agricultura.

Huete *et al.* (2002), avaliaram os índices NDVI e EVI obtidos pelo sensor MODIS a partir de medidas aéreas de reflectância de quatro tipos florestas. Simultaneamente, os índices foram correlacionados com medidas biofísicas. Em ambos os casos, os resultados apresentaram boas correlações, confirmando a potencialidade do uso científico dos produtos MOD13Q1. Em comparação ao sensor AVHRR, do satélite NOAA 14, os autores também encontraram alta fidelidade dos índices obtidos pelo MODIS.

Zhang *et al.* (2003) apresentaram uma metodologia para o estudo da fenologia da vegetação utilizando produto EVI do sensor MODIS. Segundo os autores, as estimativas baseadas em dados do MODIS do início do *greenup*, da maturidade e da dormência da vegetação mostraram fortes relações de padrões espaço-temporais. A metodologia

mostrou-se satisfatória, pois demonstrou que o EVI foi sensível às transições fenológicas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O núcleo regional de Francisco Beltrão, situado no Estado do Paraná, está localizado entre as coordenadas geográficas 53°59' 27''O, 26°23'22''S e 52°48'42''O, 25°30'16''S (Figura 3.1). Com uma área de 5.782,43 km² (IBGE, 2014a), este núcleo regional abrange os municípios de Ampére, Barracão, Bela Vista da Caroba, Bom Jesus do Sul, Capamena, Enéas Marques, Flor da Serra do Sul, Francisco Beltrão, Manfrinópolis, Marmeleiro, Pérola d'Oeste, Pinhal de São Bento, Planalto, Pranchita, Realeza, Renascença, Salgado Filho, Santa Izabel do Oeste, Santo Antônio do Sudoeste e Verê (SEAB, 2011).

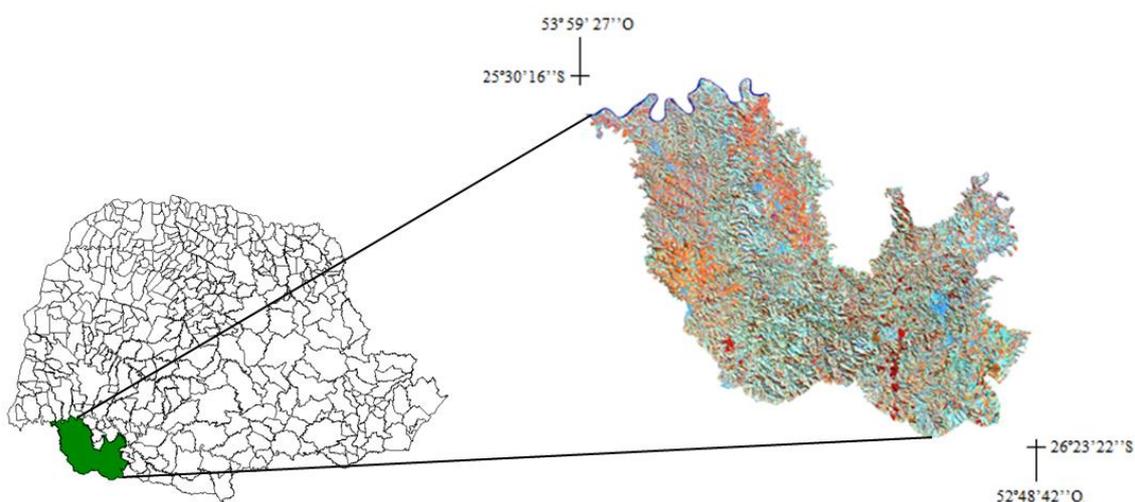


Figura 3.1 - Localização da área de estudo

Os principais cultivos na região são soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*), destacam-se ainda, cultivos de mandioca (*Manihot esculenta*), fumo (*Nicotiana tabacum*) e aveia (*Avena sativa*) (IBGE, 2014b).

De acordo com a classificação climática de Koeppen, a área de estudo abrange os tipos climáticos Cfa e Cfb. O tipo predominante dentro do núcleo regional de Francisco

Beltrão é o Cfa, caracterizado pelo verão quente, sem estação seca de inverno, em que a temperatura média do mês mais frio situa-se entre -3°C e 18°C . O restante do território é classificado como Cfb, com verão mais ameno, sendo o mês mais quente com temperatura média inferior a 22°C (CEPAGRI, 2014).

De acordo com o Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (2008), os principais solos da região são os Latossolos Vermelhos, Neossolos Litólicos e Nitossolos Vermelhos.

3.2. Metodologia

O fluxograma das etapas metodológicas propostas para o desenvolvimento da estimativa de produtividade pode ser observado na Figura 3.2.

A implantação do modelo foi feita primeiramente no aplicativo IDRISI32, exceto pela etapa de determinação do balanço hídrico, que foi realizada exclusivamente em linguagem LEGAL, com auxílio do aplicativo SPRING 5.2. A avaliação estatísticas dos valores encontrados, bem como dos erros associados ao modelo regional ETA foram desenvolvidos em Excel. A avaliação da influência do dado ETA sobre o modelo foi realizada também em linguagem LEGAL/SPRING.

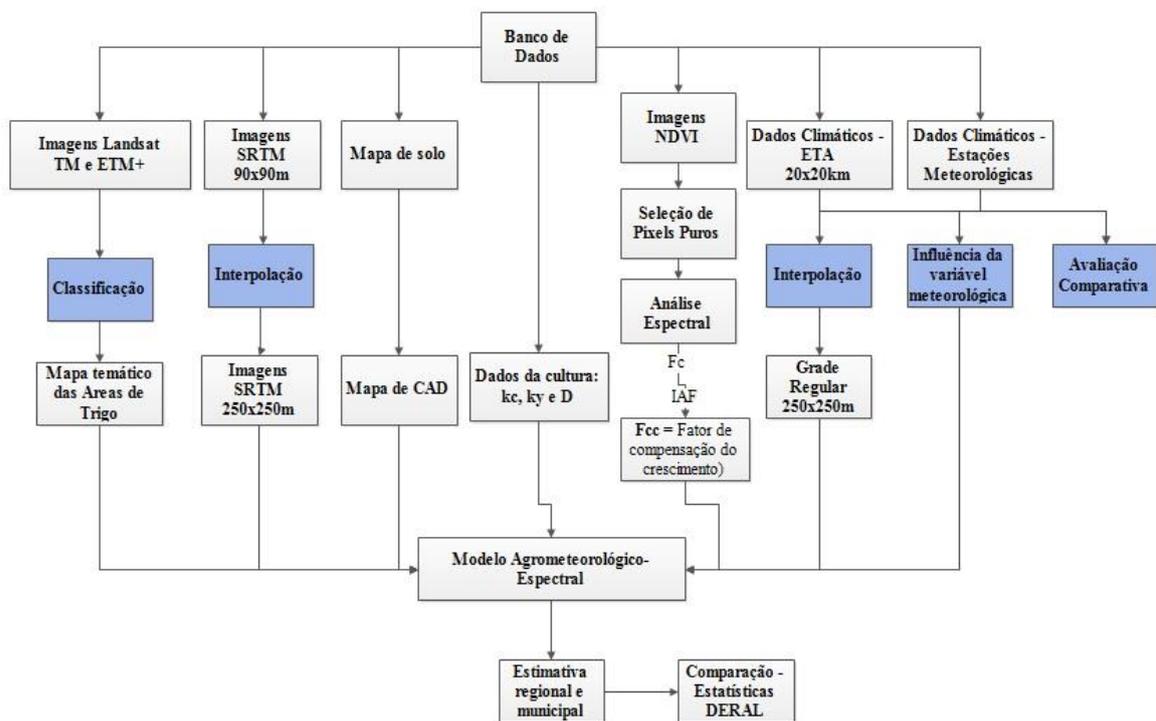


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia utilizada para a estimativa de produtividade agrícola

A Tabela 3.1 descrever todas as variáveis de entrada do modelo agrometeorológico-espectral, bem como as fontes de dados e os procedimentos a que foram submetidos os dados para que fossem adequados à modelagem.

Tabela 3.1 – Dados e procedimentos empregados na pesquisa

VARIÁVEL	FONTE	PROCEDIMENTO
Distribuição espacial das lavouras	TM/Landsat-5 e ETM+/Landsat-7	Classificação de áreas tritícolas
Mapa de solos	ITCG	Associação do tipo de solo à CAD
Altimetria	SRTM - NASA	Interpolação da resolução espacial de 90x90m para 250x250m
DADOS DA CULTURA		
Coefficiente da cultura (kc)	Doorenbos e Kassam (1979)	
Fator de resposta da produção (ky)		
Profundidade efetiva de raiz (D)		
VARIÁVEIS ESPECTRAIS		
Índices de vegetação NDVI e EVI	MOD13Q1/MODIS	Análises do comportamento dos índices de vegetação
VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS ESTIMADAS		
Temperaturas Média, Máxima e Mínima (°C)	ETA - CPTEC	Interpolação da resolução espacial de 20x20km para 250x250m
Precipitação (mm)		
Velocidade do Vento (m.s ⁻¹)		
Radiação Solar Incidente (W.m ⁻²)		
Umidade Relativa do Ar (%)		
VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS OBSERVADAS EM ESTAÇÕES		
Temperaturas Média, Máxima e Mínima (°C)	IAPAR SIMEPAR	Avaliação comparativa com os dados previstos pelo Modelo ETA
Precipitação (mm)		
Insolação (horas)		

O mapa de solos do Estado do Paraná em formato *shape file*, na escala de 1:600.000, foi obtido no endereço eletrônico <http://www.itcg.pr.gov.br>. Apesar do mapa de solo não ser um dado de entrada direto no modelo de produtividade, ele é imprescindível na elaboração do mapa temático de capacidade de água disponível no solo (CAD).

3.3 Mapa temático com a distribuição espacial das lavouras de trigo

O processamento digital das imagens foi realizado com o auxílio dos aplicativos SPRING 5.2, Weka 3.6 e eCognition 8.7. Iniciou-se o fluxo de trabalho nas plataformas eCognition 8.7 e Weka 3.6, obtidos os resultados da classificação semi-automática, estes foram inseridos no Spring 5.2, para realizar a interpretação visual por meio da edição matricial.

O fluxograma das etapas metodológicas propostas pode ser observado na Figura 3.3.

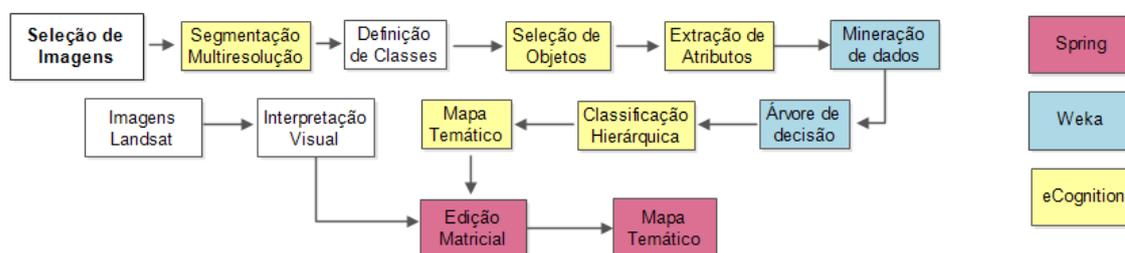


Figura 3.3 - Fluxograma de processamento para elaboração do mapa temático de trigo

O mapeamento das lavouras de trigo na área de estudo foi feita por meio da classificação de imagens de reflectância de superfície, derivadas das imagens dos sensores TM/Landsat-5 e produtos (frações solo e vegetação), derivados do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (SHIMABUKURO; SMITH, 1991). Segundo os autores, nesta abordagem a resposta espectral de um pixel, em qualquer comprimento de onda espectral, pode ser considerada como uma combinação linear das respostas de cada componente que se supõem estar na mistura. As frações solo e vegetação foram calculadas no ENVI 4.7. As imagens de reflectância de superfície foram obtidas da página eletrônica do U.S. Geological Survey (USGS), no endereço eletrônico <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Foram utilizadas imagens da órbita/ponto 223/78, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 de 07/08/2011.

3.3.1 Análise de Imagem Orientada a Objetos

- **Segmentação das imagens**

As imagens selecionadas foram convertidas para nível de cinza (NC) e posteriormente foram importadas para o aplicativo eCognition 8.7. Nesta plataforma o primeiro procedimento realizado foi a segmentação. As variáveis e parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.2. O algoritmo de segmentação utilizado neste trabalho foi o multirresolução, proposto por Baatz e Schäpe (2000), que utiliza o conceito de crescimento por regiões, no qual objetos da imagem ou regiões são mesclados em objetos maiores a partir de um critério de homogeneidade. Este critério pode ser ajustado pela escolha do parâmetro escala, dos pesos das bandas espectrais, do fator cor e do fator compacidade.

Tabela 3.2 - Resumo de variáveis e parâmetros utilizados na segmentação.

Variável Segmentada	
Imagem	Peso
TM/Landsat (b1, b2, b3, b4, b5, b7)	1
Frações (solo e vegetação)	1
Parâmetro de escala	
Escala	30
Composição de critério de Homogeneidade	
Forma	0,8
Compacidade	0,4

- **Determinação de classes, escolha de atributos e construção do conjunto de treinamento**

Duas classes de interesse foram definidas para a classificação semiautomática: trigo e outros. Para a coleta de amostras de pontos para treinamento, a classe outros foi subdividida em 4 subclasses: área urbana, floresta, corpos d'água e solo exposto.

Posteriormente a essa etapa, foi realizada a extração de atributos definidos pela plataforma eCognition 8.7. As informações contidas no conjunto de treinamento podem ser visualizadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resumo das informações contidas no conjunto de treinamento

Lista de Atributos	
Tipo	Nome
Espectral	<i>Mean b1</i>
	<i>Mean b2</i>
	<i>Mean b3</i>
	<i>Mean b4</i>
	<i>Mean b5</i>
	<i>Mean b7</i>
Customizado	Fração Solo
	Fração Vegetação

- **Mineração de dados**

As técnicas de mineração de dados são utilizadas com o objetivo de encontrar padrões, classificar registros e extrair informações de grandes conjuntos de dados (MILLER *et al.*, 2009). Na presente pesquisa, a mineração das amostras de treinamento foi realizada no aplicativo Weka 3.6. Dessa forma, as amostras foram importadas para essa plataforma e a partir delas foi gerado o modelo de conhecimento (árvore de decisão). O algoritmo utilizado para gerar a árvore de decisão foi o C4.5, desenvolvido por Quinlan (1993).

- **Classificação semiautomática**

Uma vez que a árvore de decisão escolhida foi replicada dentro do eCognition 8.7, executou-se a classificação hierárquica das imagens que gerou como um produto final um mapa temático com a distribuição das classes e subclasses de interesse. A classificação hierárquica separa classes de maior separabilidade para, em um segundo momento, separar as subclasses ou classes de maior incerteza (VIEIRA, 2010).

- **Validação e Edição dos Mapas Temáticos**

A classe denominada trigo, presente no mapa temático obtidos pelo eCognition 8.7, em formato shapefile, foi importada para o aplicativo Spring 5.2 onde foi realizada a edição matricial. De acordo com Rizzi e Rudorff (2005), a classificação digital seguida pela

interpretação visual das imagens multitemporais e multiespectrais permite corrigir os erros de omissão e inclusão por meio da edição do mapa temático. Portanto, a edição matricial é essencial para corrigir erros da classificação, de forma a representar com maior fidelidade a distribuição das áreas tritícolas, mediante interpretação visual de imagens TM/Landsat-5 e ETM/Landsat-7.

Neste contexto, em função das fases dos ciclos fenológicos, para realizar essa etapa foram utilizadas as imagens das bandas 3, 4 e 5 de oito datas coletadas ao longo da estação de crescimento da cultura (Figura 3.4), conforme pode ser observado na Tabela 3.4. Além das imagens de satélite, foi utilizado os Relatórios de Acompanhamento da situação de plantio/colheita fornecido pela SEAB que contempla as principais culturas existentes na área, o que auxiliou na discriminação do trigo através do calendário agrícola das culturas presentes na região.

Tabela 3.4 – Informações da série temporal do ano safra 2011

Data de aquisição	Sensor	Características
16/03	TM	Anterior ao plantio
17/04	TM	Início do Plantio
03/05	TM	Plantio – Desenvolvimento
12/06	ETM+	Desenvolvimento
14/07	ETM+	Desenvolvimento
07/08	TM	Desenvolvimento
18/10	ETM+	Final do ciclo - Colheita

Na Figura 3.4 é mostrada a fase do ciclo fenológico do trigo na área plantada para o ano safra 2011, adaptado do Calendário de Acompanhamento da situação de plantio/colheita do trigo, fornecido pela Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), para o núcleo regional de Francisco Beltrão.

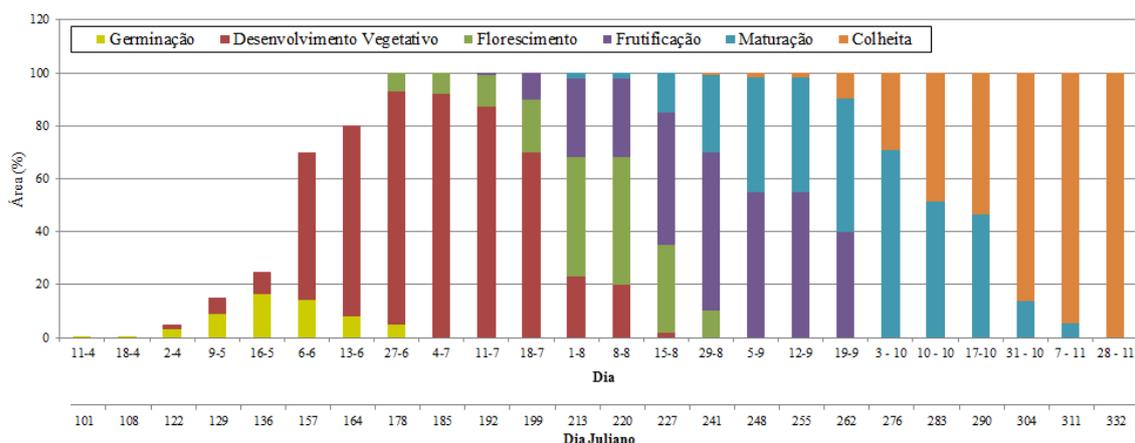


Figura 3.4 - A área cultivada com trigo em função das fases fenológicas

Fonte: SEAB (2011)

O plantio do trigo foi realizado no período de abril a junho. Entre os dias 11 de abril a 16 de maio a maior parte do trigo estava na fase de germinação, entre os dias 06 de junho e 18 de julho predominou-se a fase de desenvolvimento vegetativo (período compreendido da sementeira até o aparecimento da plântula). A fase de floração (polinização ao início da frutificação) teve início em meados de julho, para as lavouras plantadas mais cedo e, para a maioria das lavouras o florescimento ocorreu na primeira quinzena do mês de agosto. Da mesma maneira, a fase de frutificação (entre fecundação até enchimento de grãos) teve início em agosto e término na primeira quinzena de setembro. A fase de maturação (fim da frutificação e a maturação fisiológica) ocorreu de agosto a outubro. A colheita de trigo foi realizada nos meses de outubro e novembro.

- **Seleção de pixels das imagens MODIS completamente ocupadas com trigo**

De acordo com Doraiswamy e Cook (1995), a confiabilidade das estimativas de produtividade de grãos melhorou com o aumento da pureza dos pixels, portanto, a partir do mapa de classificação das áreas tritícolas derivado de imagens TM/Landsat-5 e ETM+/Landsat-7, foi gerada uma máscara de cultivo com tamanho de pixels de 250x250m (compatível com as imagens MODIS) para a seleção de índices de vegetação em pixels puros, ou seja, com 100 % de ocupação com trigo.

3.4 Análise do comportamento espectral da vegetação

O produto MOD13Q1 em forma de mosaicos de 16 dias, gerado a partir de imagens do sensor MODIS, foi obtido gratuitamente no endereço eletrônico <http://modis.gsfc.nasa.gov/>. Este produto é composto pelas imagens NDVI, EVI, bandas do azul (BLUE, 459-479 nm), vermelho (RED, 620-670 nm), infravermelho próximo (NIR, 841-876 nm) e infravermelho médio (MIR, 2105-2155 nm). As imagens são disponibilizadas em formato HDF (*Hierarchical Data Format*) na projeção sinusoidal, divididas em recortes espaciais denominados *tiles*, de 10° x 10°. Nesse estudo, foi utilizado o *tile* H13V11. As imagens HDF foram convertidas para imagens GeoTiff, com coordenadas LAT/LONG e Datum WGS-84, utilizando o programa MRT (MODIS Reprojection Tool), disponível no endereço eletrônico https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool.

Nessa etapa, fez-se a extração dos valores de índices vegetativos por pixel puro e, posteriormente, a análise do comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI com o intuito de avaliar a sensibilidade destes às fases fenológicas da cultura. Na Tabela 3.5, são mostrados os períodos de imagens MODIS/TERRA selecionados para o estudo. A escolha do período utilizado nesta pesquisa teve como base as datas de plantio e colheita das lavouras localizadas na área de estudo, com o intuito de analisar o ciclo fenológico da cultura estudada.

Tabela 3.5 – Mosaicos do Produto MOD13Q1 do sensor MODIS/TERRA e respectivos períodos correspondentes

Dia Juliano	Período
145	25/05/11 a 09/06/11
161	10/06/11 a 25/06/11
177	26/06/11 a 11/07/11
193	12/07/11 a 27/07/11
209	28/07/11 a 12/08/11
225	13/08/11 a 28/08/11
241	29/08/11 a 13/09/11
257	14/09/11 a 30/09/11
273	01/10/11 a 15/10/11

3.5 Variáveis meteorológicas

3.5.1 Dados Modelo ETA

Utilizou-se as variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo CPTEC, previsão de 24 horas do modelo regional ETA, disponibilizados nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC, com condição inicial às 00 UTC e resolução espacial de 20 km. As informações utilizadas nesta pesquisa são previsões do modelo regional ETA para o período de 2011. Foram empregados os dados meteorológicos de temperaturas do ar (mínima, média e máxima (°C)), velocidade do vento a 10 metros de altura ($m.s^{-1}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar incidente ($W.m^{-2}$) e precipitação pluvial (mm).

Os dados do Modelo ETA foram adaptados ao formato de entrada do modelo agrometeorológico-espectral, conforme metodologia descrita em Rizzi *et al.* (2006) e Sugawara (2010). Na primeira fase, transformaram-se os dados horários (correspondentes aos horários de 06, 12, 18 e 00 UTC) fornecidos em formato ASCII para dados diários, com início as 0600 UTC e término no horário 0000 UTC. As equações para adequação dos dados estão descritos a seguir nas Equações 3.1 a 3.5:

- **Precipitação:**
$$P_{diária} = P_{06} + P_{12} + P_{18} + P_{00} \quad (3.1)$$

- **Umidade relativa:**
$$UR_{med} = \frac{UR_{06} + UR_{12} + UR_{18} + UR_{00}}{4} \quad (3.2)$$

- **Velocidade do vento:**
$$Vel_{med} = \frac{Vel_{06} + Vel_{12} + Vel_{18} + Vel_{00}}{4} * 0,748 \quad (3.3)$$

- **Temperatura média:**
$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{T_{06} + T_{18}}{2} \quad (3.4)$$

- **Radiação solar incidente:**
$$R_S = \frac{R_{S06} + R_{S12} + R_{S18} + R_{S00}}{4} * 0,0864 \quad (3.5)$$

A constante 0,748 (Eq. 3.3), corresponde à transformação da velocidade do vento a 10 metros de altura para velocidade do vento a 2 metros de altura e a constante 0,0864 (Eq. 3.5) é a conversão de unidade de $W.m^{-2}$ para $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$.

Para que os dados ETA estivessem no mesmo formato dos dados de mosaico de 16 dias do NDVI/MODIS e que coincidisse com a composição temporal do produto, a

precipitação pluviométrica foi somada e médias foram calculadas para as demais variáveis meteorológicas em intervalos de 16 dias. Posteriormente, os dados foram especializados no formato de grades regulares de 250 x 250 m. Utilizou-se o algoritmo de interpolação vizinho mais próximo para que fossem mantidos os valores das amostras na grade sem gerar valores intermediários (INPE, 2014).

3.5.2 Dados de Estação Meteorológica

Para avaliar o modelo ETA foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura (°C) e precipitação (mm.dia⁻¹) obtidos a partir de duas estações do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e uma estação do Instituto Tecnológico Simepar. Dados ausentes (falta de informação) foram preenchidos com a média entre as medidas do horário seguinte e do anterior da observação ausente.

Na avaliação dos dados de radiação incidente do modelo ETA, em função de falhas presentes nos dados de estação, foram utilizados apenas dados meteorológicos obtidos da estação de Planalto, IAPAR. As estações utilizadas são identificadas pelo nome da cidade, latitude e longitude na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Localização das Estações Meteorológicas

Estação	Lat (°S)	Long (°W)
Francisco Beltrão - IAPAR	-26,05	-53,04
Planalto - IAPAR	-25,42	-53,47
Francisco Beltrão - SIMEPAR	-26,08	-53,07

Para tornarem-se compatíveis com os dados ETA e produtos MODIS, todos os dados foram organizados em períodos de 16 dias, os dados de precipitação foram acumulados, enquanto os demais dados foram organizados na forma de médias.

3.6 Análise comparativa entre os dados do Modelo Regional ETA e os dados de estações meteorológicas

Na quantificação das diferenças entre os valores estimados pelo Modelo ETA e os valores observados nas estações meteorológicas, foram utilizados os seguintes índices estatísticos: regressão linear, média dos erros (MBE), raiz do quadrado médio dos erros

(RMSE) e média dos erros absolutos (MAE) definidos, respectivamente, pelas equações 3.6 a 3.8:

$$MBE = \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_o)}{N} \quad (3.6)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - P_o|}{N} \quad (3.7)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_o)^2}{N}} \quad (3.8)$$

em que: N é o número total de previsões, P_i é a i-ésima medida prevista, ou seja, obtido diretamente do Modelo Eta, e P_o é a i-ésima medida observada na estação meteorológica.

O MBE indica se os dados modelados são subestimados (valor negativo) ou superestimados (valor positivo) em relação aos dados observados. O erro absoluto (MAE) é uma média dos erros absolutos, utilizado para quantificar a proximidade entre o dado estimado e o dado observado. A RMSE é medida da magnitude média dos erros e será sempre um valor positivo. Quanto mais próximo de zero, maior a precisão da modelagem.

3.7 Verificação da influência da radiação solar incidente o Modelo de Produtividade

Nesta etapa procedeu-se a análise da influência da radiação solar incidente estimada pelo modelo ETA sobre a estimativa de produtividade gerada pelo modelo agrometeorológico-espectral. Para a análise de influência, utilizou-se o decréscimo dos valores da radiação estimada pelo modelo ETA que foi tomada como referência. Conforme descrito na Tabela 3.7, optou-se pelo decréscimo de 5%, 10% e 20% do dado de referência. Os mesmos procedimentos de estudo de influência de variáveis meteorológicas são descritos em Sugawara (2010) e Lemos Filho *et al.* (2010).

Tabela 3.7 – Variação nos valores de radiação com base nos valores estimados pelo modelo regional ETA

Teste	Variação
0	(Referência – ETA)
1	-5 %
2	- 10%
3	- 20 %

Conforme descrito em Lemos Filho *et al.* (2010), o critério para utilização desses decréscimos baseia-se no fato dos valores limite da radiação se aproximar daquele de ocorrência na natureza, ou seja, valores de radiação incidente na superfície podem ser menores ou iguais a radiação máxima de céu claro (R_{so}).

Como os dados do modelo ETA são superestimados em aproximadamente $5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ em relação aos dados medidos em estação meteorológica, foi feita a verificação apenas da influência do decréscimo da radiação sobre o modelo de produtividade. Dessa maneira, a radiação proveniente do modelo ETA não sofreu acréscimos, para que os valores de radiação incidente não fossem maiores do que os valores de radiação máxima de céu claro (R_{so}). Entretanto, valores menores de radiação são possíveis, pois são influenciados pela presença ou não de nuvens.

3.8 Modelo Agrometeorológico – Espectral

Com o intuito de estimar a produtividade agrícola, Doorembos e Kassam (1979) propuseram um modelo que estima a produtividade potencial (Y_p) da cultura no qual se considera que as necessidades climáticas e fisiológicas são adequadas. O modelo se baseia na penalização da produtividade máxima em função da disponibilidade de água no solo, dada pela relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração máxima (ET_m), limitada por um fator de resposta à produtividade (k_y) (Equação 3.9). O fator de resposta da produção ou índice de sensibilidade ao déficit hídrico (k_Y) é um fator que descreve a redução da produção relativa de acordo com a redução da ET_r causada pela falta de água. Os valores de k_Y são específicos da cultura e podem variar

ao longo do seu crescimento (ALLEN *et al.*, 1998). Os valores de k_y para o trigo são descritos na Tabela 3.11.

Desse modo, a produtividade real pode ser obtida penalizando-se a produtividade potencial em função do déficit de água. O modelo permite o cálculo da produtividade em períodos parciais ao longo do ciclo da cultura, sendo que a produtividade final é determinada através do somatório das produtividades parciais.

$$Y_{est} = Y_p \left[1 - k_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) \right] \quad (3.9)$$

em que: Y_{est} = produtividade real ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); Y_p = produtividade potencial ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); k_y = fator de resposta à produtividade, varia de acordo com o estágio fenológico da cultura; ET_r = evapotranspiração real [$\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$]; ET_m = evapotranspiração máxima [$\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$].

Ao introduzir neste modelo informações de índice de área foliar derivados de dados de sensoriamento remoto deu-se origem ao modelo denominado de agrometeorológico-espectral. A abordagem utilizada nesta pesquisa não difere, fundamentalmente, daquela empregada por Rizzi (2004), Rosa (2007) e Sugawara (2010), que utilizaram dados de sensoriamento remoto para calcular o índice de área foliar (IAF) usado no cálculo do fator de compensação de crescimento (F_{cc}), conforme é mostrado na Equação 3.10, para o cálculo da produtividade máxima ou potencial (Y_p).

3.8.1 Determinação da produtividade potencial (Y_p)

Entende-se por produtividade potencial (Y_p) de uma cultura como a maior produtividade esperada para determinado cultivar, bem adaptado ao ambiente de crescimento, onde água, nutrientes, pragas e doenças não limitam o rendimento. A radiação solar incidente e a temperatura são os fatores climáticos que determinam a produtividade potencial (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A produtividade potencial pode ser obtida da seguinte forma:

$$Y_p = F_{cc} * F_r * F_{pa} * ND * PMB \quad (3.10)$$

em que: Yp = produtividade máxima potencial [kg ha^{-1}]; Fcc = fator de compensação do crescimento; Fr = fator de respiração; Fpa = fator de produtividade agrícola; ND = número de dias; PMB = produção de matéria seca bruta do grupo da cultura [kg ha^{-1}].

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a relação entre o índice de área foliar e o fator de compensação de crescimento é expressa na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Relação entre o índice de área foliar da cultura e o fator de compensação de crescimento

IAF	1	2	3	4	≥ 5
F_{cc}	0,2	0,3	0,4	0,48	0,5

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979) – Tabela 6, pág. 13.

Com base em dados tabulados (Tabela 3.8) apresentados em Doorenbos e Kassam (1979), Sugawara (2002) ajustou a seguinte equação para determinar o F_{cc} :

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,644 - (0,515 * IAF))} \quad (3.11)$$

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

Os valores de IAF podem ser adquiridos em medições de campo ou estimados a partir de imagens de satélite, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ($NDVI$). Os valores do $NDVI$ utilizados foram derivados do produto MOD13Q1.

As imagens $NDVI$ foram transformadas em imagens fração da cobertura do solo conforme a Equação 3.12, proposta por Choudhury *et al.* (1994).

$$F_c = 1 - \left[\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^{0,9} \quad (3.12)$$

em que: F_c = fração do solo coberto pela cultura; $NDVI_{max}$ e $NDVI_{min}$ são os valores de máximo e de mínimo do $NDVI$ da área de cultivo, respectivamente; $NDVI$ = valor do $NDVI$ de cada pixel da área cultivada pela cultura.

Posteriormente, o IAF foi estimado pela Equação 3.13 sugerido por Norman *et al.* (2003).

$$IAF = -2 * \ln(1 - F_c) \quad (3.13)$$

em que: F_c = fração do solo coberto pela cultura obtido na equação anterior e IAF = índice de área foliar para cada pixel da imagem.

O fator de respiração (Fr) utilizado na Equação 3.10 é uma variável relacionada com o gasto de energia. De acordo com Doorenbos e Kassam (1979), quando a planta é submetida à temperatura menor do que 20°C, utiliza 60% da energia gerada para a sua própria manutenção e utiliza 50% dessa energia quando submetida à temperatura média acima de 20°C.

O fator de produtividade agrícola (F_{pa}) (Equação 3.10) estabelece a relação entre a produção total colhida e a parte comercializável do produto, ou seja, relaciona a produtividade obtida e a matéria seca total. Nesse estudo, foi utilizado o valor de 0,41 (DOORENBOS E KASSAM, 1979).

O intervalo temporal entre duas medidas (ND; Equação 3.10), refere-se, nesse caso, ao número de dias de cada período da composição de imagens de índice de vegetação do sensor MODIS, ou seja, de 16 dias.

De acordo com Doorenbos e Kassam (1979), a produção de matéria seca bruta depende da espécie cultivada e da temperatura do ambiente. Para uma cultura padrão assume-se que a taxa de produção de matéria seca (t_m) é igual a 20 kg.ha⁻¹.dia⁻¹. A taxa de produção (t_m) pode ser maior ou menor do que 20 kg.ha⁻¹.dia⁻¹, de acordo com a temperatura e o tipo de cultura. A produção de matéria seca para o trigo é descrito na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Taxa de produção de matéria seca (t_m) para cultura do trigo em função da temperatura média do ar (t_{med})

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

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979, p. 12).

Desta forma, determinou-se a produção de matéria seca bruta (PMB) da cultura do trigo, de acordo com as seguintes equações descritas por Doorenbos e Kassam (1979):

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

$$PMB = F * (0,8 + 0,01 * t_m) * t_n + (1 - F) * (0,5 + 0,025 * t_m) * t_c \quad (3.14)$$

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

$$PMB = F * (0,5 + 0,025 * t_m) * t_n + (1 - F) * (0,05 * t_m) * t_c \quad (3.15)$$

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

A taxa de produção de matéria seca de uma cultura padrão em dias completamente nublados (t_n) e a taxa de produção de uma cultura padrão em dias claros (t_c) são descritos na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Taxa de produção de matéria seca em dias claros (t_c) e em dias nublados (t_n) ao longo da estação de crescimento do trigo no núcleo regional de Francisco Beltrão

Sul - Lat 20°	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
t_c (kg.ha ⁻¹ .dia ⁻¹)	348	325	334	371	407	439
t_n (kg.ha ⁻¹ .dia ⁻¹)	178	164	170	193	215	235

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

A fração do dia em que o céu está encoberto é determinada pela Equação 3.16 conforme método descrito por Doorenbos e Kassam (1979):

$$F = \frac{(R_{SO} - (0,5 * R_S))}{0,8 * R_{SO}} \quad (3.16)$$

sendo: R_{SO} = máxima radiação de onda curta recebida em dias claros, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_S = radiação de onda curta real incidente, [MJ.m⁻².dia⁻¹].

3.8.2 Determinação da evapotranspiração

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada pelo solo e transpirada pela vegetação durante um determinado período. O processo de evapotranspiração depende principalmente da quantidade de energia solar recebida, da planta, do solo e do clima, variando com a extensão de área coberta pela vegetação e com as estações do ano (BERNARDO *et al.*, 2008).

A evapotranspiração potencial varia de cultura para cultura, desse modo, necessita-se, primeiramente, definir a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET_o). Em seguida, é determinada a evapotranspiração máxima da planta, ou seja, a evapotranspiração quando há ótimas condições de desenvolvimento, permitindo a produção potencial desta cultura no campo. A relação entre a ET_o e a ET_m é expressa pelo coeficiente da cultura (k_c). Por sua vez, a evapotranspiração real da cultura é a quantidade de água evapotranspirada sob condições normais de cultivo, podendo ser menor ou igual à ET_m , ambas podem ser relacionadas através do balanço hídrico, da

água disponível no solo e da água remanescente do solo, conforme descrito por Doorenbos e Kassam (1979).

A evapotranspiração potencial de referência (ET_0) é a evapotranspiração de uma gramínea que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica ou nutricional, com altura média de 0,12m e albedo de 23% (BERNARDO *et al.*, 2008). A evapotranspiração de referência (ET_0) é computada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), conforme a Equação 3.17:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (3.17)$$

Em que: ET_0 = evapotranspiração potencial de referência, [mm.dia⁻¹]; R_n = saldo de radiação na superfície da cultura, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; G = Fluxo de calor do solo, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; T = temperatura média a 2m de altitude, [°C]; u_2 = velocidade do vento a 2 m de altitude, [m.s⁻¹]; e_a = pressão de saturação de vapor, [kPa]; e_s = pressão real de vapor, [kPa]; Δ = Inclinação da curva de pressão de vapor de saturação, [kPa.°C⁻¹]; γ = Constante psicrométrica, [kPa.°C⁻¹].

O saldo de radiação (R_n) é definido por Allen *et al.* (1998) como:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.18)$$

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (3.19)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (3.20)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (3.21)$$

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \cdot \text{cos}(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)] \quad (3.22)$$

Em que: R_n = saldo de radiação, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_{ns} = radiação líquida de ondas curtas, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_{nl} = radiação líquida de onda longa de saída, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; R_s =

radiação de onda curta real incidente, [MJ.m⁻².dia⁻¹]; σ = constante de Stefan-Boltzmann, [4,903 x 10⁻⁹ MJ.K⁻⁴.m⁻².dia⁻¹]; T_{max,K} = temperatura máxima absoluta durante o período de 24 horas, [Kelvin]; T_{min,K} = temperatura mínima absoluta durante o período de 24 horas, [Kelvin]; e_a = Pressão de saturação real de vapor, [kPa]; α = albedo ou coeficiente de reflexão da copa = 23%; z = elevação do ponto acima do nível do mar, [m]; ω_s = ângulo horário do Sol, [rad]; G_{sc} = constante solar = 0,0820 MJ.m⁻².min⁻¹; d_r = inverso da distância relativa Terra- Sol; ω_s = ângulo horário do Sol, [rad]; φ = latitude, [rad]; δ = declinação solar, [rad].

Os valores de d_r, ω_s e δ são determinados pelas equações a seguir:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right) \quad (3.23)$$

$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left[\left(\frac{2\pi}{365} * J\right) - 1,39\right] \quad (3.24)$$

$$\omega_s = \text{arcos}[-\text{tg}(\varphi) * \text{tg}(\delta)] \quad (3.25)$$

em que: J = é o número de dias no ano (dia Juliano).

Conforme Allen *et al.* (1998), as pressões de saturação real de vapor (e_a), saturação de vapor (e_s), a inclinação da curva de pressão de vapor de saturação (Δ) e a constante psicrométrica (γ) são expressas como:

$$e_a = \frac{UR * e_s}{100} \quad (3.26)$$

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (3.27)$$

$$e^o(T) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right] \quad (3.28)$$

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3.29)$$

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (3.30)$$

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} * P \quad (3.31)$$

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - (0,0065 * z)}{293} \right)^{5,26} \quad (3.32)$$

em que: e_a = pressão de vapor atual, [kPa]; UR = umidade relativa, [%]; e_s = pressão de saturação de vapor, [kPa]; $e^o(T)$ = pressão de saturação de vapor na temperatura T, [kPa]; T = temperatura do ar, [°C]; Δ = inclinação da curva de pressão de vapor de saturação, [kPa.°C⁻¹]; T = temperatura média, [°C]; γ = constante psicrométrica, [kPa.°C⁻¹]; P = pressão atmosférica, [kPa].

A evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) é a evapotranspiração de determinada cultura quando não há restrições ao seu desenvolvimento (BERNARDO *et al.*, 2008). A relação entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração de referência (ET_o) é expressa pela equação 3.33:

$$ET_m = k_c * ET_o \quad (3.33)$$

em que: ET_m = evapotranspiração máxima da cultura, [mm.dia⁻¹]; ET_o = evapotranspiração potencial de referência, [mm.dia⁻¹]; k_c = coeficiente da cultura.

Os valores de k_c variam com o tipo da cultura, o seu estágio de desenvolvimento, o comprimento do seu ciclo vegetativo e as condições climáticas locais (BERNARDO *et al.*, 2008). O valores de k_c para o trigo são descritos na Tabela 3.11.

A evapotranspiração real da cultura (ET_r) é a evapotranspiração de determinada cultura, sob as condições normais de cultivo, dessa maneira, ET_r pode ser menor ou igual a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m). Se $ET_r = ET_m$ as necessidades hídricas da cultura estão sendo atingidas plenamente mediante o suprimento de água. Se $ET_r < ET_m$ o suprimento de água não atende as necessidades hídricas da cultura (BERNARDO *et al.*, 2008).

Doorenbos e Kassam (1979) descreveram que a evapotranspiração real (ET_r) é determinada pela combinação entre a água remanescente no solo (ARS), o índice de

água disponível no solo (IADS) e a evapotranspiração máxima (ET_m). A água remanescente no solo é calculada da seguinte forma:

$$ARS = (1 - f) * CAD * D \quad (3.34)$$

Em que: ARS = água remanescente no solo, [mm]; f = fator de disponibilidade de água no solo; CAD = capacidade de água disponível no solo, [mm]; D = profundidade efetiva do sistema radicular, [m].

A profundidade efetiva (D) representa a camada desde a superfície do solo até onde se concentra a maior parte das raízes absorventes (PIRES *et al.*, 2000). Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a absorção de água está relacionada com a densidade do sistema radicular. Em geral, 50 a 60% da absorção total de água ocorre no intervalo de 0-0,3m, de 20 a 25% a partir de 0,3 - 0,6 m, 10 a 15% a partir 0,6-0,9m, e menos de 10% na profundidade de 0,9 -1,2m. Nesse estudo, portanto, é utilizada a profundidade efetiva máxima de 0,3 m (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Valores do Fator de resposta da produção (k_y), coeficiente da cultura (k_c) e profundidade efetiva de raiz (D) por período

Período	k_y	k_c	D (m)
145	0,2	0,3	0,10
161	0,3	0,4	0,15
177	0,4	1,1	0,20
193	0,65	1,1	0,25
209	0,6	1,1	0,30
225	0,55	0,65	0,30
241	0,45	0,65	0,30
257	0,25	0,65	0,30
273	0,1	0,25	0,30

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979, pag.28)

O fator de disponibilidade de água no solo (f) representa o limite de água prontamente disponível no solo, ou seja, é a faixa de umidade dentro da qual a cultura não entra em déficit hídrico e, conseqüentemente, não sofre redução em sua taxa máxima de evapotranspiração (BERGAMASCHI *et al.*, 1992; EMBRAPA MILHO E SORGO, 2010). Dessa forma, para uma mesma cultura, quanto maior for a demanda evaporativa menor será o valor de f , ou seja, mais estreita será a faixa de água prontamente disponível (BERGAMASCHI *et al.*, 1992; BERNARDO *et al.*, 2008).

O fator de disponibilidade de água no solo é sempre menor do que 1. Quando o fator de disponibilidade de água no solo (f) é consumida a evapotranspiração real (ET_r) é menor do que a evapotranspiração máxima (ET_m). Nessas condições o valor de ET_r dependerá da água restante no solo e disponível para a cultura (RUDORFF, 1985).

Os valores do fator de disponibilidade de água no solo (f) para cultura em relação a evapotranspiração máxima (ET_m) são mostrados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Fator de disponibilidade de água no solo (f) para o grupo do trigo

ET_m (mm/dia)								
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979, pag.28)

A CAD representa o máximo de água disponível que determinado solo pode reter em função das suas características físico-hídricas. O mapa de capacidade de armazenamento de água foi desenvolvido, de acordo com o procedimento realizado por Rizzi (2004), conforme mostrado na Tabela 3.13:

Tabela 3.13 - Classe Pedológica do solo e capacidade de armazenamento de água

Classe Pedológica do Solo	CAD (mm)
<i>Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico de textura arenosa</i>	50
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho (menos de 35% de argila), Neossolo Litólico</i>	70
<i>Luvisolos, Argilossolos, Nitossolos, Latossolos (exceto Latossolo Vermelho com menos de 35% de argila), Cambissolos e Neossolo Flúvico de textura média a argilosa.</i>	100

Fonte: Rizzi, 2004

O índice de água disponível no solo (IADS), descrito por Doorenbos e Kassam (1979), é calculada da seguinte forma:

$$IADS = \frac{P_e + ARM_p - ARS}{ET_m} \quad (3.35)$$

Em que: $IADS$ = índice de água disponível no solo; P_e = precipitação do período, [mm acumulado]; ARM_p = disponibilidade real de água no solo no início do período; ARS = água remanescente no solo, [mm]; ET_m = evapotranspiração máxima do período, [mm].

Quando $IADS \geq 1$, temos $ET_r = ET_m$; porém, quando $IADS < 0$, a relação entre ET_r e ET_m é tão pequena que o crescimento da cultura é comprometido (RUDORFF, 1985). A disponibilidade real de água no solo no início do período (ARM_p) foi determinada por meio do balanço hídrico utilizando método de Thornthwaith e Mather (1955), utilizando linguagem LEGAL, descrito em Sugawara (2002) e Rosa *et al.* (2011).

Determinados os fatores água remanescente no solo (ARS) e índice de água disponível no solo (IADS), a relação desses com a evapotranspiração real (ET_r) é obtida de Doorenbos e Kassam (1979) (Tabela 3.14).

Uma vez obtidos todos os parâmetros empregados no modelo, pôde-se determinar a penalização da produtividade máxima em função da disponibilidade de água no solo ao

longo do ciclo da cultura e, conseqüentemente, a produtividade agrícola real (Equação 3.9).

Tabela 3.14 – Relação entre evapotranspiração real (ETr), índice de água disponível no solo (IADS), água remanescente no solo (ARS) e evapotranspiração máxima (ETm).

ARS (mm)	IADS=0.83					IADS=0.67				
	ETm (mm/dia)					ETm (mm/dia)				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
25	1,9	3,8	5,6	7,3	9,1	1,8	3,3	4,8	6,1	7,5
50	2	3,9	5,7	7,6	9,4	1,9	3,6	5,2	6,7	8,1
100	2	3,9	5,9	7,8	9,6	1,9	3,8	5,5	7,2	8,8
150	2	4	5,9	7,8	9,7	2	3,8	5,7	7,4	9,1
200	2	4	5,9	7,9	9,8	2	3,9	5,7	7,5	9,3

ARS (mm)	IADS=0.5					IADS=0.33				
	ETm (mm/dia)					ETm (mm/dia)				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
25	1,6	2,8	3,8	4,8	5,8	1,3	2,1	2,8	2,8	4,2
50	1,7	3,2	4,4	5,5	6,5	1,6	2,7	3,5	3,5	5
100	1,9	3,5	5	6,3	7,6	1,8	3,2	4,3	4,3	6,2
150	1,9	3,7	5,3	6,7	8,1	1,8	3,4	4,7	4,7	7
200	1,9	3,7	5,4	7	8,5	1,9	3,5	5	5	7,5

ARS (mm)	IADS=0.17					IADS=0				
	ETm (mm/dia)					ETm (mm/dia)				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
25	1,1	1,5	1,8	2,2	2,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
50	1,4	2,1	2,8	3	3,3	1,2	1,5	1,6	1,7	1,7
100	1,7	2,8	3,6	4,2	4,7	1,5	2,3	2,8	3	3,2
150	1,7	3,1	4,2	5	5,7	1,7	2,7	3,5	4	4,3
200	1,8	3,3	4,5	5,5	6,4	1,7	3	4	4,7	5,1

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979, pag. 34)

3.9 Análise estatística dos dados de produtividade

Os dados estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral foram comparados com os dados fornecidos pelo Departamento de Economia Rural (DERAL) e analisados estatisticamente utilizando o teste paramétrico, de Student - Teste T pareado, com intervalo de confiança de 95%.

Aplicou-se o teste t pareado (Equação 3.36), para testar a hipótese: $H_0: \mu_{antes} = \mu_{depois}$ e

$H_a: \mu_{antes} \neq \mu_{depois}$.

$$t = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} = \frac{\sqrt{n} \bar{d}}{S_d} , \quad (3.36)$$

em que: \bar{d} é a diferença das médias das duas observações, S_d é o desvio padrão das médias e n é o número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Mapeamento das áreas de trigo

Foi observado na composição RGB (453) que o padrão espectral do trigo era diferente dos outros alvos contidos na área de estudo. O trigo, além de apresentar uma textura lisa, nesta combinação de bandas apresentou também uma tonalidade avermelhada, contrastando com a mata natural (textura rugosa) e com o solo exposto (ciano), conforme pode ser visto na Figura 4.1. Vale ressaltar que na data de 07/08/2011, o trigo encontrava-se no período de florescimento, com máxima intensidade fotossintética e, portanto, com altos níveis de cinza no infravermelho próximo.

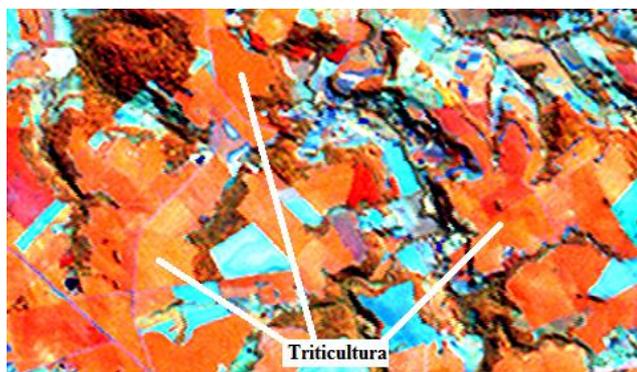


Figura 4.1 - Caracterização do padrão espectral de lavouras tritícolas na composição colorida RGB (453) do TM/Landsat-5 (07/08/2011)

A árvore de decisão gerada pelo classificador estrutural C4.5 é exibida na Figura 4.2. A escolha da árvore de decisão se deu em função do relatório da validação cruzada gerado pelo WEKA. Os resultados obtidos por meio da árvore de decisão apresentou um índice Kappa de 0,91, com acerto de 93,4 % dos dados de teste. Além disso, testes foram feitos para escolher a árvore de decisão cuja classificação melhor representou as áreas tritícolas.

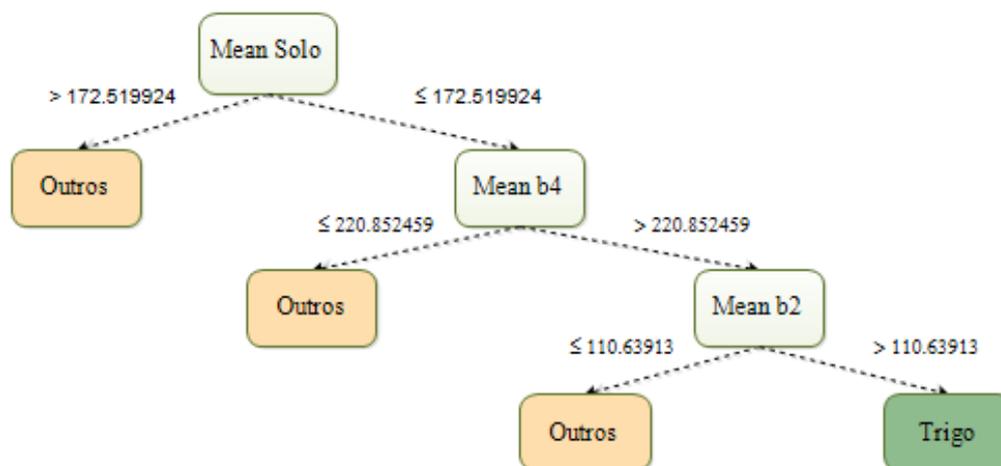


Figura 4. 2 - Árvore de decisão empregada na classificação das áreas de trigo

Observa-se que os atributos usados para descrever os padrões do trigo foram *Mean* Fração Solo, *Mean* b4 (banda do infravermelho próximo) e *Mean* 2 (banda do verde). O primeiro particionamento da árvore usou o atributo *Mean* Solo, em que houve a separação entre as áreas de solo exposto (e regiões urbanas) e áreas vegetadas. Na fração solo, áreas de solo exposto e áreas urbanas representadas por níveis de cinza altos, apareceram claras nas imagens, enquanto áreas vegetadas apresentaram tonalidades escuras (baixo nível de cinza).

No nó seguinte, foi utilizado o atributo *Mean* b4, praticamente todas as áreas de florestas foram separadas das áreas tritícolas. Áreas tritícolas apresentaram valores de níveis de cinza maiores do que os da classe floresta. Esse fato pode ser explicado pelo sombreamento mútuo das folhas e demais partes aéreas das árvores, que diminui a incidência da radiação sobre o dossel, diminuindo a reflectância na região do infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

No terceiro nó, utilizou-se o atributo *Mean* b2. Neste caso, as áreas tritícolas foram separadas do restante das áreas florestadas. A maior parte da radiação solar incidente é absorvida por pigmentos como clorofila, xantofilas e carotenos, com bandas de absorção no azul e no vermelho. A maioria das folhas são moderadamente transparentes

na região verde (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010), apresentando altos níveis de cinza nessa região.

O mapa temático de localização das lavouras tritícolas obtidos pela aplicação do método de classificação por Análise de Imagem Orientada a Objeto pode ser vistos na Figura 4.3. Os erros observados na classificação automática foram corrigidos através de interpretação visual, por meio da Edição Matricial.

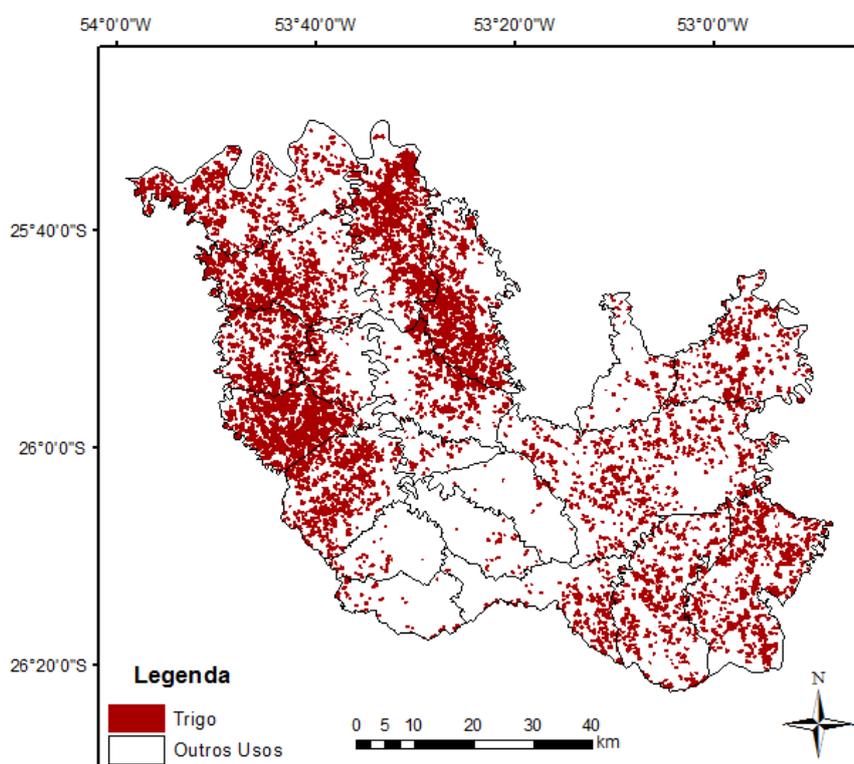


Figura 4.3 – Mapa temático com a distribuição espacial das áreas tritícolas – Núcleo Regional de Francisco Beltrão – Ano Safra 2011

De posse do mapa temático de trigo, calculou-se a área cultivada com trigo no núcleo regional de Francisco Beltrão e, posteriormente, fez-se uma análise comparativa com as informações de área disponibilizadas pelo DERAL (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Área Cultivada com a Cultura do Trigo obtida por meio das imagens TM/Landsat-5, DERAL, diferença relativa (em ha) e em porcentagem (%), ano safra 2011.

Áreas tritícolas			
Classificação	Deral (a)	Diferença (Landsat-Deral) (b)	Diferença Relativa (%) (b*100)/a
	72.235,9	75.000,0	-2.764,1
			-3,7

Observa-se que a área total de trigo, na região de Francisco Beltrão, quando obtida por meio de interpretação de imagens foi menor em 3,7%, comparada às informações do Deral. No entanto, ressalta-se que as metodologias utilizadas são diferentes, enquanto a interpretação das imagens tem uma abordagem objetiva a outra tem caráter mais subjetivo. De qualquer forma, esta análise comparativa é justificável sob o ponto de vista de balizamento da metodologia adotada nos dados orbitais. Neste caso, observa-se que a diferença entre a área de trigo mapeada através das imagens de satélites e a do Deral foi muito pequena, o que leva a crer que os resultados obtidos são coerentes. O mapa temático serviu de base para selecionar na área de estudo amostra de pixels puros nos dados MODIS, ou seja, com 100% de ocupação com trigo.

4.2. Comportamento das variáveis meteorológicas

Na Figura 4.4 são mostrados os valores médios de precipitação, temperaturas mínima, média, e máxima do ar no período de cultivo do trigo e na Figura 4.5 é mostrada a radiação média na superfície (R_s). Os valores de precipitação, temperatura e radiação estimados pelo modelo ETA estão apresentados em escala temporal de 16 dias, compatível com os dados do Índice de vegetação.

A quantidade potencial de radiação que pode atingir a superfície é determinada pela sua localização e época do ano (Allen *et al.*, 1998). A energia incidente influencia os outros fatores meteorológicos tal como a temperatura do ar. Pelas Figuras 4.4 e 4.5, nota-se que o aumento de radiação é acompanhado pelo aumento das temperaturas média, máxima e mínima do ar.

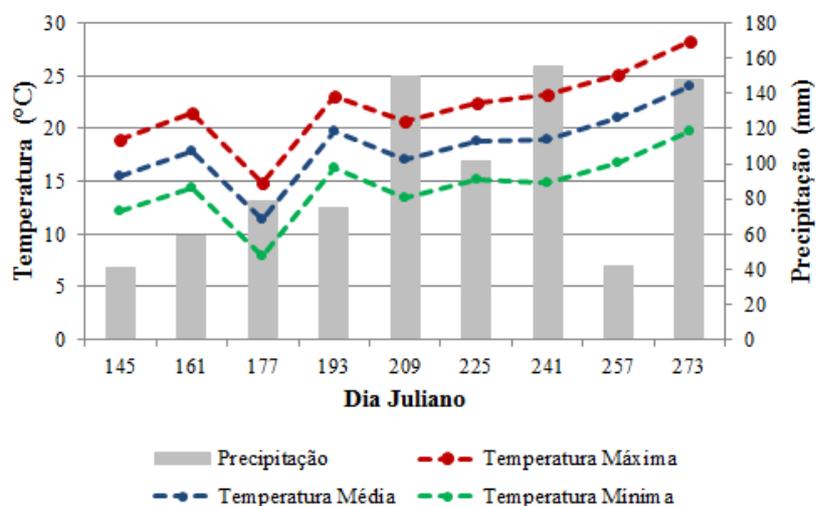


Figura 4.4 – Temperatura média, máxima e mínima do ar (°C) e precipitação média (mm) no período de estudo.

Nota-se nos gráficos de temperatura (Figura 4.4,) que durante quase todo ciclo da cultura a temperatura permaneceu entre 15°C e 20°C, exceto no período que compreendeu ao dia 177, quando a temperatura ficou entre 10°C e 15 °C, e no final do ciclo, período em que a temperatura variou de 20°C e 25°C. Como se percebe, a temperatura não foi um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do trigo, pois está contida na faixa temperatura que foi descrita por Martins (2008) e Rodrigues *et al.* (2011) como sendo ótima para o cultivo do trigo.

A precipitação média durante o ciclo foi de 850,22 mm, ou seja, maior do que a precipitação recomendada por Doorenbos e Kassam (1979). Observou-se menores valores de precipitação durante as fases de germinação e desenvolvimento vegetativo (dias 145 a 193). Em relação ao início do ciclo, houve aumento da precipitação no período em que o trigo encontrava-se na fase de florescimento (dias 209 e 225). O mesmo ocorreu no final do ciclo (dia 273), quanto também foram observadas valores de precipitação maiores do que aqueles observados no início do ciclo da cultura do trigo. Esse fato corrobora com DALMAGO (2009), que descreve que no Sul do País, durante

a época de maturação e colheita são verificadas precipitações maiores do que durante a implantação da cultura.

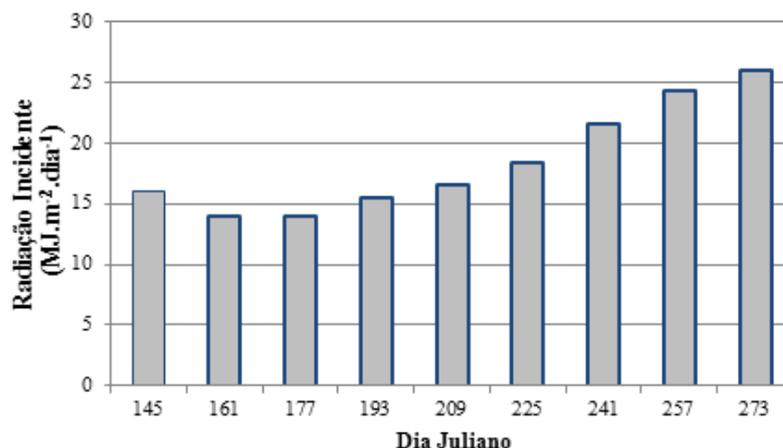
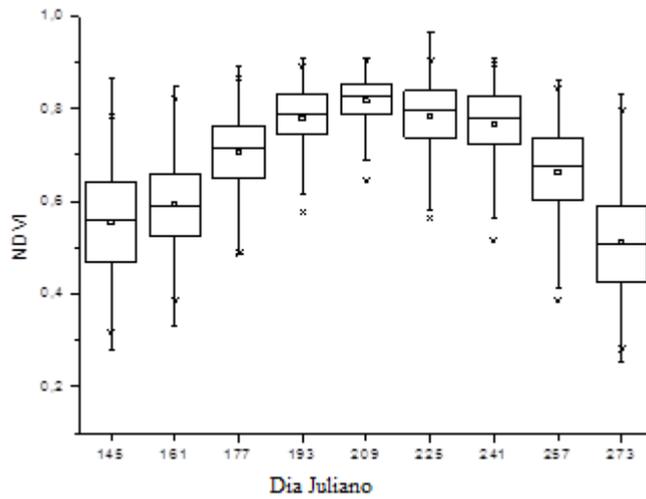


Figura 4.5 – Radiação Solar Incidente média (MJ.m⁻².dia⁻¹) no período de estudo

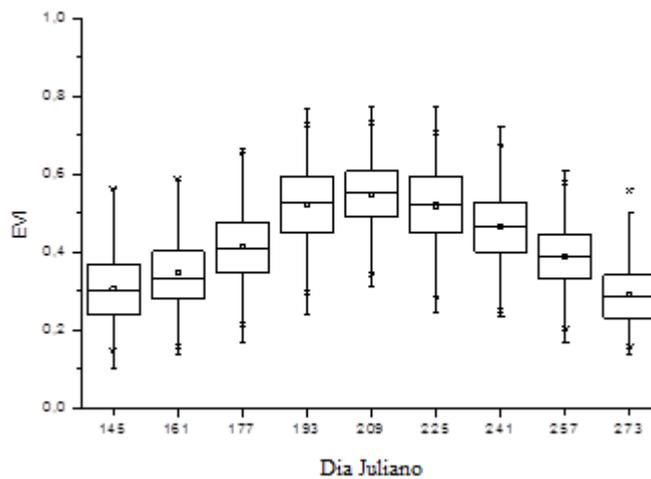
Observam-se menores valores de radiação incidente no início do ciclo da cultura, no entanto, esse não é um fator limitante ao desenvolvimento do trigo, pois segundo RODRIGUES *et al.* (2011) a energia utilizada no início do desenvolvimento do embrião é retirada do endosperma, portanto, a luz não é preponderante nesse processo. Por ser uma planta de dia longo o trigo necessita de períodos longos de luz para florescer (MARTINS, 2008), portanto, o aumento dos valores de radiação incidente favorece o desenvolvimento da planta.

4.3. Comportamento dos índices de vegetação NDVI e EVI

Na Figura 4.6 pode ser visto o comportamento dos índices NDVI e EVI ao longo do ciclo de crescimento do trigo.



(a)



(b)

Figura 4.6 - Comportamento dos índices de vegetação (a) NDVI e (b) EVI – no Núcleo Regional de Francisco Beltrão, Ano Safra 2011

Durante todo o ciclo da cultura os valores do NDVI foram maiores do que os observados para o EVI. Observa-se que ambos os índices de vegetação são sensíveis as diferentes fases do ciclo fenológico do trigo, pois apresentaram o comportamento esperado, ou seja, valores mais baixos no início e no final do ciclo, consequência do menor índice de área foliar e senescência das folhas, respectivamente.

Nota-se, no entanto, que no início do ciclo os dois índices apresentaram valores relativamente altos, isto pode ser atribuído ao sistema de plantio, que na sua maior parte

é o sistema direto. Além disso, oscilações nos valores dos índices durante o ciclo fenológico do trigo podem ser decorrentes dos diferentes ângulos de visada característicos do imageamento do sensor MODIS para composição de imagens de 16 dias livres de nuvens que causam variações nas respostas espectrais.

É possível perceber ainda que os valores máximos dos dois índices foram alcançados no dia 209, coincidindo com a época em que a maioria das lavouras estava na fase de florescimento, período de máxima expansão foliar e conseqüentemente, máxima intensidade fotossintética, demonstrando a sensibilidade dos índices ao incremento da biomassa. Como as relações entre NDVI e parâmetros da cultura estão descritos de forma abrangente em literatura, optou-se pela utilização do NDVI na determinação do IAF.

A Figura 4.7 mostra o comportamento do IAF. Como o índice de vegetação é usado indiretamente para expressar a cobertura do solo, quanto maior o valor do índice vegetativo maior a cobertura do solo e maiores os valores de IAF.

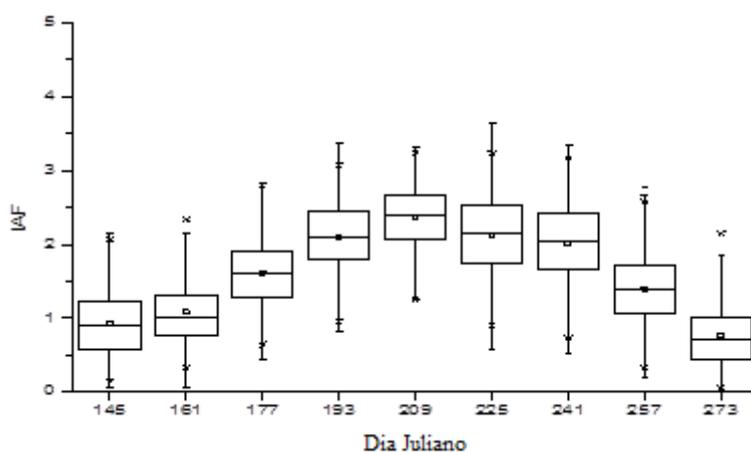


Figura 4.7 – Comportamento do Índice de Área Foliar no Núcleo Regional de Francisco Beltrão, Ano Safra 2011

Na área de estudo, há presença de trigo de ciclos precoce, médio e tardio, resultando em áreas de plantio em diferentes estádios de desenvolvimento. Em função de

características próprias do cultivo, tipo de solo, manejo e adubação, o aumento do índice de área foliar não ocorre na mesma intensidade para os vários talhões (EIPHANIO e FORMAGGIO, 1991). No modelo agrometeorológico-espectral, variáveis referentes aos tratos culturais, fertilidade do solo, variedade, entre outras, são manifestadas nos valores do NDVI (RUDORFF; BATISTA, 1989) e conseqüentemente, observadas no IAF estimado a partir desse.

Os valores do IAF, obtidos nesta pesquisa, por meio da metodologia de Choudhury *et al.* (1994) (Eq.3.9), foram menores quando comparados com as informações de literatura. Entretanto, nota-se que o IAF estimado por meio do NDVI apresentou tendência esperada, ou seja, menores valores no início do cultivo até um máximo crescimento e posteriormente, o decaimento dos valores, em função da senescência das folhas. Demonstrando que o produto NDVI fornecido pelo sensor MODIS pode ser utilizado na estimativa de IAF e este último pode ser empregado no modelo de produtividade.

Como F_{cc} é dependente do IAF, os valores de IAF resultaram em valores F_{cc} menores do que 0,4, portanto, inferiores ao ponto de saturação (0,5), descrito por Doorenbos e Kassan (1979).

4.5. Análise estatística dos dados do Modelo Regional ETA

No modelo agrometeorológico-espectral utilizado nessa pesquisa, as variáveis meteorológicas que determinam a produção de matéria seca bruta (PMB) são a temperatura média e a radiação solar incidente sobre a cultura.

A quantidade de água disponível à cultura apenas influenciará na sua produtividade real se ocorrer déficit hídrico, o que acarreta em penalização dessa produtividade. No modelo agrometeorológico-espectral não é levado em conta os excessos hídricos e, quando estes ocorrem, considera-se que a quantidade de água disponível atendeu as necessidades do cultivo. No entanto, salienta-se que excesso de água no solo no período da colheita pode acarretar em prejuízo por germinação dos grãos na espiga ou até mesmo limitação para a colheita.

Por outro lado, a deficiência hídrica é determinada pelo balanço hídrico, que leva em consideração a evapotranspiração (de referência, máxima e real) da cultura. Lemos Filho *et al.* (2010) afirmam que a variável de maior influência sobre a evapotranspiração de referência é a radiação. Uma vez que a temperatura, radiação e precipitação são as variáveis de maior influência sobre a produtividade, essas foram as variáveis do modelo ETA analisadas.

Na Figura 4.8 é mostrada a relação dessas três variáveis, obtidas por meio do modelo ETA e observações feitas em estações meteorológicas para a região de estudo.

Ao comparar os valores de temperatura obtida pelo modelo ETA e através das estações meteorológicas, constata-se que as previsões meteorológicas do Modelo ETA foram menores para as temperaturas máximas e maiores para as temperaturas médias e mínimas. O modelo ETA superestimou as temperatura média e a temperatura mínimas, o que resultou em um erro médio (MBE) de 1,571°C e 2,82°C, respectivamente. Enquanto a temperatura máxima, que foi subestimada, resultou num erro médio de -0,94°C. No entanto, vale ressaltar que mesmo sendo inferiores e superiores, a faixa de variação (mínima e máxima) ficou dentro de uma amplitude de temperatura que não prejudicou a produtividade do trigo.

No caso da precipitação, verificou-se que nos dias 129, 161, 209 e 241, os valores observados em estações meteorológicas foram maiores do que os valores estimados pelo modelo ETA. Entretanto, nos demais períodos, os valores da precipitação obtidos por meio do ETA foram menores, comparados com aqueles coletados em estação. O erro médio para a série foi de -14,32 mm, ou seja, observou-se que houve subestimativa dos valores da precipitação.

Os resultados observados, tanto da temperatura, quanto da precipitação, são corroborados por Vieira Junior *et al.* (2009). Segundo os autores, os erros de modelagem podem estar associados a deficiências na modelagem dos elementos da circulação da atmosfera, dos elementos da topografia, da cobertura da superfície e das possíveis interações entre estes elementos.

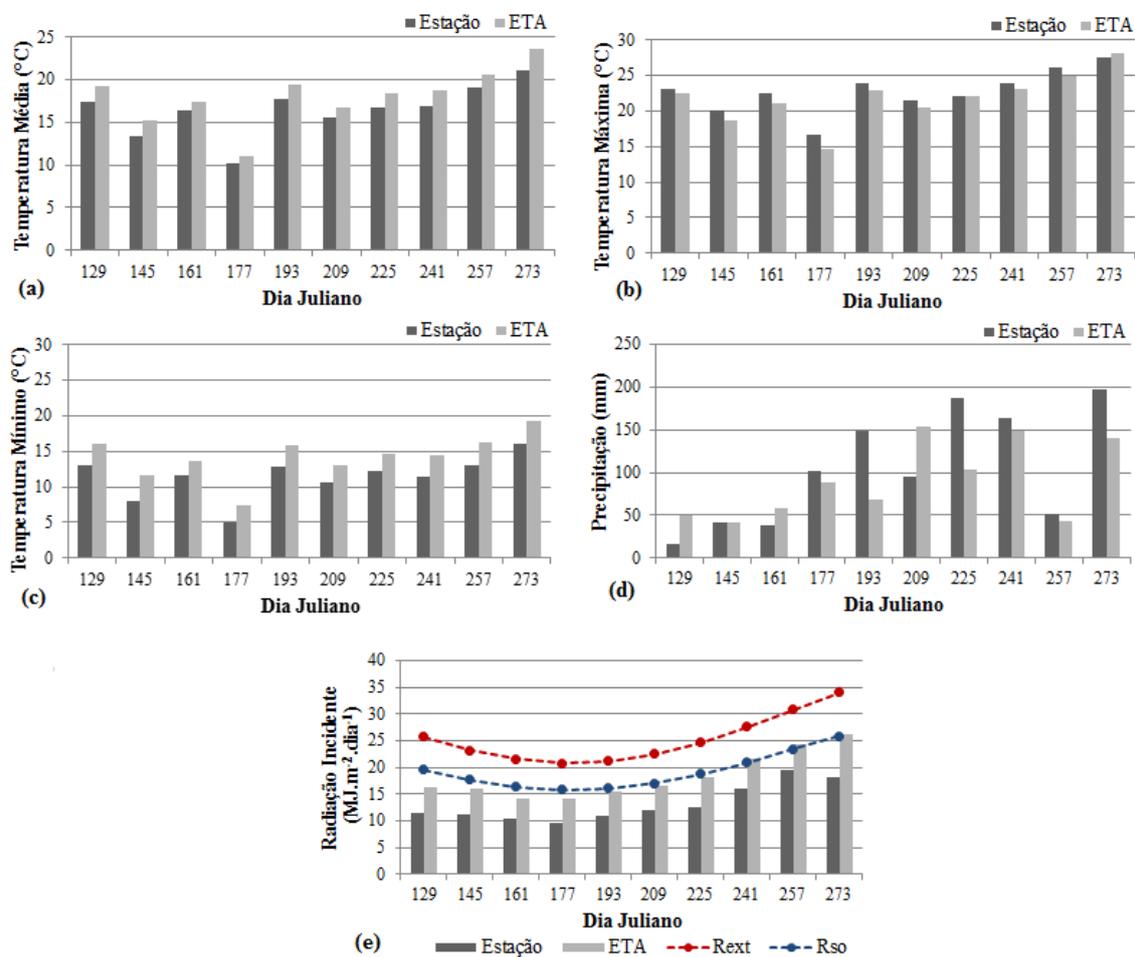


Figura 4.8 – Variáveis meteorológicas médias da área de estudo: (a) Temperatura média (°C), (b) Temperatura Máxima, (c) Temperatura Mínima (°C), (d) Precipitação acumulada (mm) e (e) Radiação Incidente (MJ.m⁻².dia⁻¹), Radiação Externa (R_{ext}, MJ.m⁻².dia⁻¹) e Radiação máxima de dia claro (R_{so}, MJ.m⁻².dia⁻¹) no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011

Ao comparar os valores da radiação estimados por meio do modelo ETA com dados da estação meteorológica de Planalto, verificou-se que a radiação solar de ondas curtas na superfície modelada pelo ETA foi superestimada, com erro médio de 4,29 MJ.m⁻².dia⁻¹, sempre tendendo à condições de céu claro (R_{so}). Esses resultados estão de acordo com Hinkelman *et al.* (1999), que ao analisar dados de Oklahoma, observou superestimava

da radiação modelada em 50 W.m^{-2} ($4,32 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Os autores atribuíram esse erro à baixa sensibilidade do modelo quanto à absorção da radiação pelo vapor de água, aerossóis atmosféricos e ao tratamento de nuvens.

Na Tabela 4.2 é mostrado, de forma resumida, os erros MAE, RMSE, MBE e coeficientes da regressão linear, para as variáveis temperatura ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm) e radiação incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

Tabela 4.2 - Análise dos dados de temperatura média ($^{\circ}\text{C}$), temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm) e radiação incidente na superfície ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) obtidos pelo modelo ETA durante o período de cultivo de trigo, no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no ano de 2011.

Variáveis	a	b	r ²	MAE	RMSE	MBE
Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$)	-3,56	1,12	0,96	1,07	1,24	-0,94
Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	0,72	1,05	0,97	1,57	1,68	1,57
Temperatura Mínima ($^{\circ}\text{C}$)	3,93	0,90	0,92	2,82	2,99	2,82
Precipitação Acumulada (mm)	43,37	0,44	0,45	40,82	50,37	-14,32
Radiação Incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)	1,22	1,21	0,93	4,10	4,29	4,10

A partir da Tabela 4.2, verifica-se que a precipitação é a variável meteorológica com menor correlação com os dados observados nas estações meteorológicas, com MAE de 40,82. As variáveis temperaturas apresentam altos coeficientes de determinação, com r^2 de 0,92 para a temperatura mínima, $r^2 = 0,97$ para temperatura média e $r^2=0,96$ para a temperatura máxima, respectivamente. Enquanto a variável radiação incidente apresentou $r^2=0,93$.

De acordo com CHOU *et al.* (2007), o modelo numérico ETA gera as previsões com base em dados médios, por exemplo, altitude média e vegetação predominante na grade (nesse caso, $20 \times 20 \text{ km}$). Assim, o modelo não se aplica diretamente a um ponto específico. Segundo os mesmos autores, para produzir previsões para um ponto específico é necessário aplicar uma correção estatística nas previsões numéricas.

Em função da complexidade, a modelagem numérica ainda não representa fielmente os processos atmosféricos. Assim, dados observacionais são importantes para

conhecimento de erros associados aos modelos, validação e calibração (DERECZYNSKI *et al.*, 2010). Neste contexto, para o emprego no modelo de produtividade, os dados disponibilizados pelo modelo ETA devem ser analisados para que seja avaliada sua influência sobre os resultados finais.

Ressalta-se que são utilizados nestas análises os valores médios das variáveis empregadas no modelo, esse procedimento pode mascarar possíveis erros associados aos dados diários. Além disso, os dados meteorológicos utilizados nessa pesquisa provêm de apenas 3 estações meteorológicas, assim a análise pode não ser sensível a variabilidade meteorológica real da área de estudo.

4.6 Estimativa da produtividade em nível Regional

A produtividade máxima foi calculada em função da radiação incidente e da temperatura média do ar através do fator PMB, bem como do IAF (incorporada à componente F_{cc}), do fator de produtividade agrícola (F_{PA}) e do fator de respiração (F_r), sendo que os dois últimos são constantes ao longo do ciclo de desenvolvimento do cultivo. Durante o ciclo fenológico, não foi observada ausência de água no solo, não sendo esse um fator limitante à produtividade do trigo, portanto, a produtividade real foi igual à produtividade máxima ($Y_{est} = Y_p$, Eq. 2.1) estimada pelo modelo.

Na Figura 4.9 são mostradas as condições climáticas médias presentes na área de estudo e o Índice de Área Foliar da cultura do trigo ao longo do ciclo fenológico.

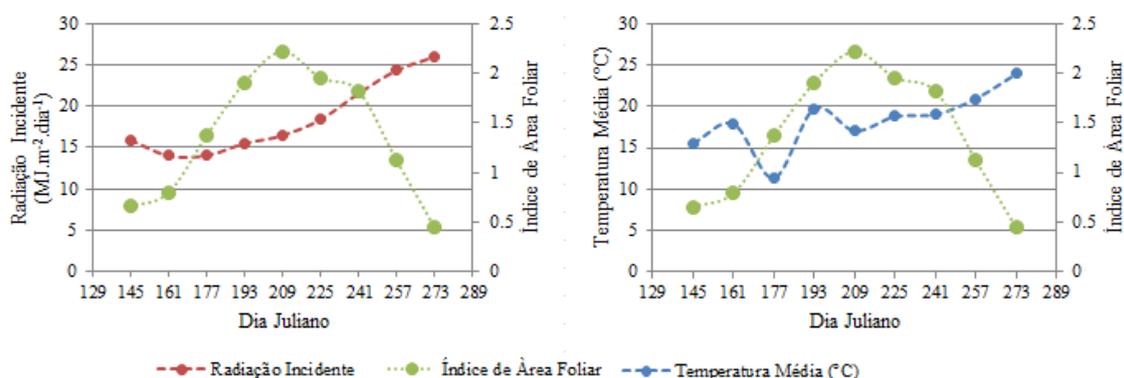


Figura 4.9 - Valores médios das variáveis meteorológicas e índice de área foliar ocorridos durante o ciclo fenológico da cultura – (a) Radiação Incidente ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e IAF e (b) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e IAF no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no ano de 2011.

Na Tabela 4.3 é mostrada a comparação da produtividade média obtida pelo modelo agrometeorológico-espectral e aquela fornecida pelo DERAL.

Tabela 4.3 - Produtividade estimada pelos modelos agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011

Dado	Produtividade média (kg.ha^{-1})	Diferença Relativa (kg.ha^{-1})	Diferença Relativa (%)
Agrometeorológico-Espectral	2307,40	97,40	4,41
DERAL	2210,00	-	-

A análise da Tabela 4.3 mostra a eficiência do modelo agrometeorológico-espectral na da estimativa da produtividade quando comparada aos dados fornecidos pelo DERAL. No ano estudado a diferença relativa foi de $97,40 \text{ kg.ha}^{-1}$, ou seja, o modelo superestimou a produtividade em apenas 4,41% em relação ao dado o DERAL.

Na Figura 4.10 é apresentada a produtividade acumulada do trigo estimada por meio do modelo agrometeorológico-espectral.

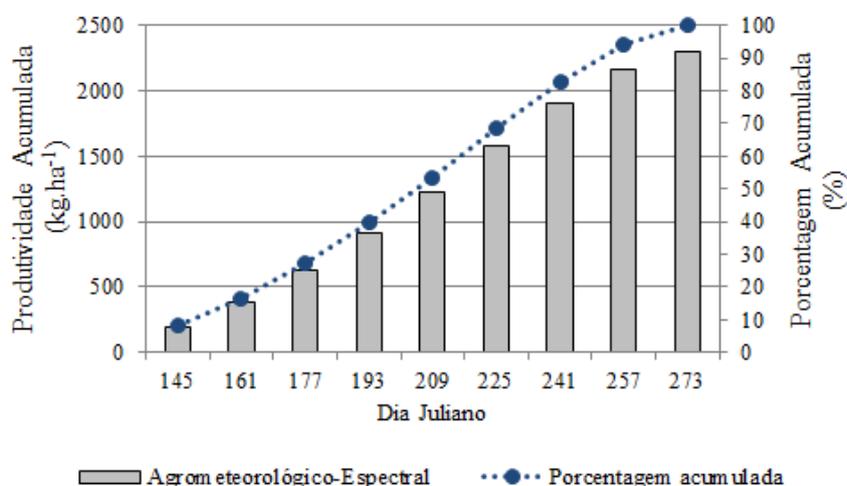


Figura 4.10 – Produtividade média acumulada do trigo estimada por meio do modelo agrometeorológico-espectral no Núcleo Regional de Francisco Beltrão no Ano Safra 2011

Na análise da Figura 4.10 observa-se que aproximadamente 70% da produtividade do trigo foi estimada até o dia 225, quando a maior parte da área de cultivo encontra-se na transição entre o período de florescimento e de frutificação. Cerca de 80% da produtividade final foi determinada no dia 241, quando a maior parte da área de estudo estava no estágio de frutificação. Fato semelhante foi observado por Rosa (2007), onde 70% da produtividade agrícola do café foi estimada no início de janeiro, com antecedência a formação dos grãos (época de granação). Como salienta DORAISWAMY *et al.*, (2007), a avaliação precoce dos rendimentos ajudam no planejamento estratégico para atendimento das demandas, nesse caso, o emprego do modelo agrometeorológico-espectral permitiu estimar a produtividade com antecedência à colheita.

4.6.1. Estimativa da produtividade em nível Municipal

Na Tabela 4.4 são mostradas as produtividade estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral em nível municipal.

Tabela 4.4 - Produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL a nível municipal no Núcleo Regional de Francisco Beltrão para o Ano Safra 2011

Município	Produtividade (kg.ha ⁻¹)		Agrometeorológico Espectral	
	Agrometeorológico-Espectral	DERAL	Diferença (kg.ha ⁻¹)	Diferença Relativa (%)
1 Ampére	2.259,87	2.200	59,87	2,72
2 Barracão	2.378,22	2.300	78,22	3,40
3 Bela Vista da Caroba	2.132,56	2.300	-167,44	-7,28
4 Bom Jesus do Sul	2.307,00	2.200	107,00	4,86
5 Capamena	1.752,04	2.100	-347,96	-16,57
6 Enéas Marques	2.513,65	2.300	213,65	9,29
7 Flor da Serra do Sul	2.396,57	2.400	-3,43	-0,14
8 Francisco Beltrão	2.450,73	2.400	50,73	2,11
9 Manfrinópolis	2.307,00	2.000	307,00	15,35
10 Marmeleiro	2.474,05	2.500	-25,95	-1,04
11 Pérola d'Oeste	2.157,24	2.400	-242,76	-10,12
12 Pinhal de São Bento	2.456,41	2.000	456,41	22,82
13 Planalto	2.074,56	1.850	224,56	12,14
14 Pranchita	2.440,12	2.400	40,12	1,67
15 Realeza	2.083,81	2.000	83,81	4,19
16 Renascença	2.479,44	2.500	-20,56	-0,82
17 Salgado Filho	2.307,00	2.000	307,00	15,35
18 Santa Izabel do Oeste	2.361,91	1.750	611,91	34,97
19 Santo Antônio do Sudoeste	2.397,33	2.200	197,33	8,97
20 Verê	2.417,31	2.400	17,31	0,72

Pode-se observar que houve subestimativa do modelo agrometeorológico-espectral apenas nos municípios de Bela Vista da Caroba, Capamena, Marmeleiro, Pérola d'Oeste e Renascença, onde as produtividades estimadas apresentaram erros relativos de 7,28%, 16,57%, 1,04% e 0,82%, respectivamente. No restante dos municípios houve superestimativa dos valores encontrados pelo modelo em relação aos valores do DERAL.

Na análise estatística aplicando teste de Student – Teste T pareado, com α de 0,05% para o modelo agrometeorológico-espectral, tem-se $t_{\text{observado}} = -8,67$ e $t_{\text{Tabelado}} = 1,725$. Como $t_{\text{observado}} < t_{\text{Tabelado}}$, aceita-se a hipótese H_0 , ou seja, não há diferença significativa entre os dados estimados e os dados fornecidos pelo DERAL, com intervalo de confiança de $2,106\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $2,315\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

O comportamento das produtividades no âmbito de município é apresentado na Figura 4.11.

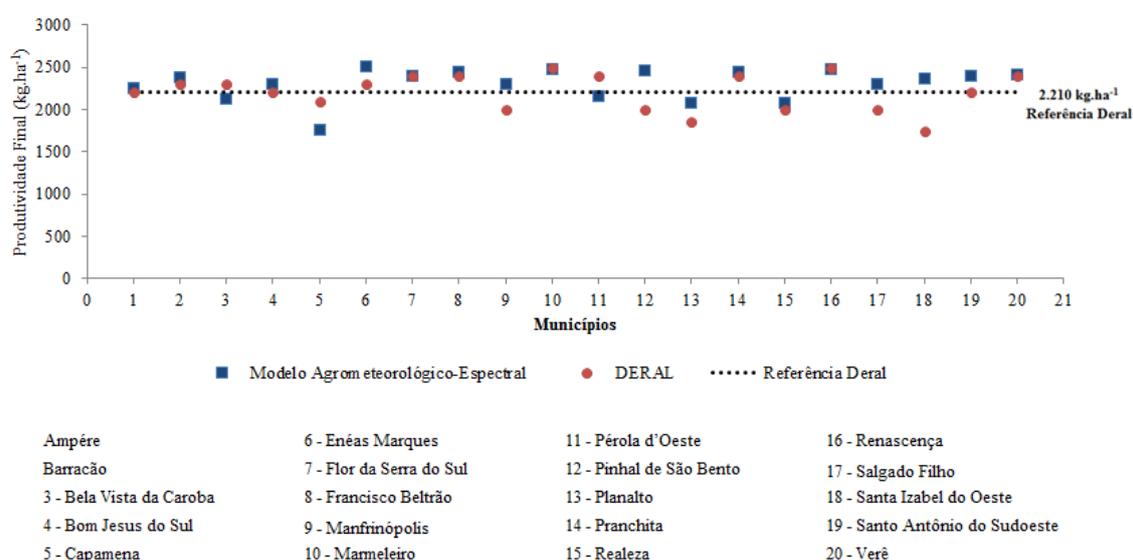


Figura 4.11 - Produtividade estimada pelos modelos agrometeorológico-espectral comparado com os dados do DERAL a nível municipal

Ao observar os valores da produtividade contidos na Figura 4.11, verifica-se que os dois resultados são semelhantes sem muita variação. A seguir, na Tabela 4.4 pode ser visto as produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral, pelo DERAL e a diferença relativa.

Como verificado, a estimativa da produtividade para região apresentou diferença relativa menor, em comparação com a estimativa a nível municipal. Como descrito por Rosa (2007), à nível municipal há uma diminuição do desempenho do modelo agrometeorológico-espectral, ou seja, são maiores as diferenças relativas encontradas

entre os valores fornecidos pelo DERAL e os valores estimados pelo modelo. Rizzi (2004) descreve resultados semelhantes no estudo da estimativa da produtividade da soja no Rio Grande do Sul.

4.7. Análise da influência da radiação solar incidente sobre a estimativa de produtividade

Observou-se no item 4.5 que o dado de radiação solar incidente do ETA foi superestimado em relação ao dado proveniente da estação de campo. Porém foi analisado somente um ponto disponível e sem falhas de dados na área de estudo. É de conhecimento que dados meteorológicos apresentam erros associados ao formato dos dados, medidas não realizadas e mesmo erro de coleta (ADAMI *et al.*, 2006) e que o dados de um local podem não representar a variabilidade meteorológica das áreas ao redor (WITHERS, 1977).

Dessa maneira, nesta etapa procedeu-se a análise espacial da influência da radiação estimada pelo modelo ETA sobre a estimativa de produtividade gerada pelo modelo agrometeorológico-espectral em nível regional. Para a análise de influência utilizou-se o decréscimo dos valores da radiação estimada pelo modelo ETA, que foi tomada como referência. Optou-se pelos decréscimos de 5%, 10% e 20% do dado de referência. A variação foi estabelecida apenas até 20% por ser essa a diferença relativa média observada entre os dados estimados pelo ETA e os dados da estação utilizada no estudo.

Sabe-se que a produtividade real é dependente das variáveis: produção de matéria seca bruta do grupo da cultura (PMB), fator de compensação do crescimento (F_{cc}), fator de respiração (F_r) e fator de produtividade agrícola (FPA). Entretanto, somente a componente PMB varia com a variação da radiação, portanto, espera-se que a diminuição da radiação provoque uma diminuição de PMB e, conseqüentemente, diminuição da produtividade final.

Na Tabela 4.5 é observada a variação da produtividade real para os respectivos decréscimos em relação a produtividade estimada com a radiação de referência.

Tabela 4.5 – Relação entre o decréscimo da radiação e os dados de referência

	Produtividade Real	Diferença	Diferença Relativa (%)
Referência – ETA	2.307,04	-	-
Decréscimo de 5%	2.255,06	47,97	2,1
Decréscimo de 10%	2.208,59	94,45	4,2
Decréscimo de 20%	2.115,64	187,39	8,5

Observa-se na Tabela 4.5, que a diminuição da radiação incidente provocou redução da produtividade estimada. Em relação aos dados de referência, os decréscimos de 5%, 10% e 20% na radiação solar incidente, resultaram em decréscimo de 2%, 4% e 8% na produtividade real, respectivamente.

Na Tabela 4.6 é mostrada a comparação entre as produtividades reais para os respectivos decréscimos da radiação de referência em comparação com os dados fornecidos pelo DERAL.

Tabela 4.6 - Produtividade estimada comparado com os dados do DERAL

	Produtividade Final	Diferença	Diferença Relativa (%)	Valor p ($\alpha=0,05$)
Deral	2.210	-	-	-
Referência	2.307,1	97,04	4,4	0,076 n.s
Decréscimo de 5%	2.255,1	-51,98	-2,3	0,33 n.s
Decréscimo de 10%	2.208,6	-46,47	-2,1	0,92 n.s
Decréscimo de 20%	2.115,6	-92,95	-4,2	0,099 n.s

Pela Tabela 4.6, nota-se que as produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral para as reduções de 5%, 10% e 20% da radiação incidente, assim como a referência do dado ETA, não apresentaram diferença estatística em relação à produtividade determinada pelo DERAL.

Os dados meteorológicos estimados pelo modelo ETA apesar da resolução espacial baixa apresentam resolução temporal alta, podendo ser adquiridos diariamente, além disso, abrangem extensas áreas da superfície, muitas delas de difícil acesso (ADAMI *et*

al., 2006; PINTO *et al.*, 2010). Além disso, como ressaltado por Sugawara (2010), na falta de dados meteorológicos mais precisos, a realização de pesquisas com estes dados é válida e necessária.

5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia proposta foi possível concluir que o modelo agrometeorológico-espectral, alimentado por dados do modelo regional ETA e do produto NDVI do sensor Modis, possui potencial para estimar a produtividade da cultura do trigo. Além disso, foi possível observar também que:

- A técnica de classificação imagem orientada ao objeto e a mineração de dados mostraram-se eficientes no mapeamento das lavouras de trigo, através de imagens do Landsat-5;
- As imagens NDVI e EVI provenientes do sensor MODIS foram sensíveis as diferentes fases do ciclo fenológico do trigo;
- O modelo de produtividade foi influenciado pelas variações da radiação incidente sobre a superfície;
- Os erros associados às diferenças observadas entre a precipitação e temperaturas (média, máxima e mínima) estimadas pelo modelo ETA e medidas em estações meteorológicas não influenciaram a produtividade final.

6. RECOMENDAÇÕES

- Não é descartada a influência do dado ETA no desempenho do modelo de produtividade, entretanto, fazem-se necessários outros estudos em locais onde existam dados das variáveis meteorológicas de campo suficientes para análise apurada dessa influência;
- Apesar dos resultados positivos decorrentes do emprego da metodologia de transformação do NDVI para valores de IAF, os valores estimados de Índice de Área Foliar foram menores do que os descritos em literatura, sendo necessários mais testes e estudos aplicando outras metodologias;
- O resultado encontrado é positivo no sentido de que os dados estimados foram obtidos o emprego de dados de sensoriamento remoto, entretanto, é necessário utilizar o modelo em outros anos safra e outras áreas para que sejam analisadas as respostas dos índices a outros solos e variedades de cultivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B.; ACOCK, M. C. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 56-61, 1991.
- ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; MOREIRA, M. A.; DEPPE, F. Avaliação de diferentes escalas temporais de chuva obtidos por modelos matemáticos e por sensoriamento remoto para o Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Forianópolis, SC. On-line. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-94550508ca7ed4ac7547f4660aafe1fb.pdf>>. Acessado em: 04 out 2013.
- 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).
- ASAR, G.; KANEMASU, E. T.; YOSHIDA, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 1, p. 1-11, 1985.
- AGUSTI, M.; S. ZARAGOZA, H. BLEIHOLDER, L. BUHR, H. HACK, R. KLOSE, R. STAUSS. **Escala BBCH para la descripción de los estadios fenológicos del desarrollo de los agrios (Gén. Citrus)**, Levante Agrícola 3. [online]. 1995. Disponível em: <<http://www.ivia.es/sdta/pdf/fichas/citricultura/citricultura6.pdf>>. Acessado em: 07 fev. 2013.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: ANGEWANDTE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSVARBEITUNG. 12, 2000, Heibelberg. **Proceedings...** Heidelberg: Wichmann-Verlag, 2000.
- BAIER, W. Note on the terminology of crop-weather models. **Agricultural Meteorology**, v. 20, n. 2, p. 137-145, 1979.
- BARET, F.; CHAMPION, I.; GUYOT, G.; PODAIRE, A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, n. 3, p. 367-378, 1987.
- BERGAMASCHI, H., BERLATO, M. A., MATZENAUER, R., FONTANA, D. C., CUNHA, G. R., SANTOS, M. L. V., FARIAS, J. R. B., BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicado à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 1992. 30-31p ISBN (85-7025-221-8).

BERNARDES, T. **Modelagem de dados espectrais e agrometeorológicos para estimativa da produtividade de café**. 2013. 126 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.04.20.07-TDI) . Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DLLLLQ8>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p. ISBN (85-7269-242-8).

CAMARGO, M.B.P; ARRUDA, H.V.; PEDRO JUNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R. Melhores épocas de plantio do trigo no Estado de São Paulo baseadas na probabilidade de atendimento hídrico. **Bragantia**, v. 44, n. 1, p. 255-261, 1985.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CAMARGO, M. B. P. de, ORTOLANI, A.A., PEDRO JUNIOR, M.J., ROSA, S.M. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja valência. **Bragantia**, v. 58, n. 1, p. 171-178, 1999.

CASTRO, P. R. C., KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de cultivos anuais**. Nobel. 1999. 126 p. ISBN (85-213-1078-1).

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA (CEPAGRI). **Clima dos municípios paulistas**. 2013. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html. Acesso em: 20 abr. 2013.

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, 1994.

COELHO FILHO, M.A.; ANGELOCCI, L.R.; VASCONCELHOS, M.R.B.; COELHO, E.F. Estimativa da área foliar de plantas de lima ácida ‘tahiti’ usando métodos não-destrutivos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 1, p. 163-167, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Levantamentos de safra**. 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>. Acessado em: 15 fev. 2013.

CORAL, A.; ASSAD, E.; PINTO, H.S.; IAFFE, A. Utilização de um modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade da cultura da soja no Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14. 2005, Campinas/SP. **Anais...** Campinas, 2005.

CUNHA, G.R. **Trigo para o mundo**. 2007. Disponível em:
<<http://www.cnpt.embrapa.br/noticias/2007/not0725.htm>>. Acessado em: 12 dez 13

CUNHA, G.R.; PIRES, J.L.F.; VARGAS, L. Bases para produção competitiva e sustentável de trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (Ed.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. Cap. 1, p. 19-26. ISBN (978-85-7574-029-3).

CUNHA, G. R. da; SCHEEREN, P. L.; PIRES, J. L. F.; MALUF, J. R. T.; PASINATO, A.; CAIERÃO, E.; SÓ E SILVA, M.; DOTTO, S. R.; CAMPOS, L. A. C.; FELÍCIO, J. C.; CASTRO, R. L. de; MARCHIORO, V.; RIEDE, C. R.; ROSA FILHO, O.; TONON, V. D.; SVOBODA, L. H. **Regiões de adaptação para trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 10 p. Disponível:
<http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci20.htm>. Acessado em: 24 nov. 2013.

CUNHA, G.R., HAAS, J.C., MALUF, J.R.T., CARAMORI, P.H., ASSAD, E.D., BRAGA, H.J., ZULLO JR., J., LAZZAROTTO, C., GONÇALVES, S., WREGE, M., BRUNETTA, D., DOTTO, S.R., PINTO, H.S., BRUNINI, O., THOMÉ, V.M.R., ZAMPIERI, S.L., PASINATO, A., PIMENTEL, M.B.M., PANDOLFO, C., Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 400-414, 2001.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. DE; FARIA, R. T. DE; GONSALVES, A. C. A.; REZENDE R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo cropgro-soybean na determinação das melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 4, p.583-589, 2006.

DALMAGO, G.A.; PASINATO, A.; CUNHA, G.R.; SANTI, A.; PIRES, J.L.F. **Cultivo do trigo**. EMBRAPA TRIGO, 2013. Disponível em:
<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Trigo/CultivodeTrigo/zoneamento.htm>>. Acessado em: 24 nov. 2013.

DERECZYNSKI, C.P.; PRISTO, M.V.J.; CHOU, S.C.; CAVALCANTI, I.F.A.; ROZANTE, J.R.; Avaliação das Previsões do Modelo Eta na Região da Serra do Mar (Estado de São Paulo), Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 36-51, 2010.

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

DORAISWAMY, P.C., COOK, P.W. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 21, p. 43-51, 1995.

DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, T.J.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 4, p. 548-559, 2004.

eCOGNITION. **eCognition developer 8.7**: userguide. Munich: Trimble, 2011. 258 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. p 412.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA SOJA). **História do trigo no Brasil**. 2014. Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?cod_pai=6&op_page=91. Acessado em: 23 nov 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA TRIGO). **Trigo em números**. 2014. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/economia/2014_01_TRIGO%20em%20numeros.pdf. Acessado em: 14 abr 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA TRIGO) - **Cultivo de trigo**. 2014. Disponível em: <https://www.spo.cnpia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3704&p_r_p_-996514994_topicoId=3044>. Acessado em: 23 nov 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA MILHO E SORGO). **Sistema de produção**. 2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/glossario.htm>, Acessado em: 22 jun 2013.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto de três parâmetros agronômicos de trigo e feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 10, p.1615-1624, 1991.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FACHINELLO, J.C.; NACHTIGAL, J.C.; KERSTEN, E. **Fruticultura**: fundamentos e práticas. Pelotas: UFPel, 1996. 311p. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/livros/fundamentos-fruticultura/index.htm>>. Acessado em: 22 jun 2013.

FIGUEIREDO, D.C. Projeto GeoSafras – aprimoramento metodológico das estimativas de safras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, INPE, p. 191-195.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M. B., LAUSCHNER, M. H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 6, n. 3, p. 399-403, 2001.

FRITZSONS, E., MANTOVANI, L.E., AGUIAR, A.V.. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no Estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**. v. 10, n. 1, p. 49-64, 2008.

GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 2, p. 165-173, 2004.

HABOUDANE, D.; MILLERA, J.R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P.J.; STRACHANE, I.B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**. v. 90, n.3, p 337–352, 2004.

HATFIELD, J.L.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, WALTHALL, J. S. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 117-131, 2008.

HINKELMAN, L. M.; ACKERMAN, T. P.; MARCHAND, R. T. An evaluation of NCEP Eta Model predictions of surface energy budget and cloud properties by comparison with measured ARM data. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. 16, p.19535-19549, 1999.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1996.

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

INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Técnicas para a produção de trigo no Paraná**. 2013. Disponível em: <[http://www.fiepr.org.br/sindicatos/sinditrigo/uploadAddress/Cartilha-Trigo\[31702\].pdf](http://www.fiepr.org.br/sindicatos/sinditrigo/uploadAddress/Cartilha-Trigo[31702].pdf)>. Acessado em: 22 jun 2013.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Cartas climáticas do Paraná**. 2013. Disponível em:
<<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acessado em: 09 fev. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2003. Disponível em:
<www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>. Acesso em: 15 fev. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Modelagem digital de terreno**. 2013. Disponível em:
<<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>>. Acessado em: 08 jul 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGEa). **Cidades**. 2014. Disponível em:
<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=41&search=parana>.
Acessado em 20 abr. 2013

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGEb). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2011. Disponível em:
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf/default.asp>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA (IPMA). **Agrometeorologia**. 2013. Disponível em:
<<http://www.ipma.pt/pt/agrometeorologia/mapas/>>. Acessado em 12 fev. 2013.

IGNACZAK, J. C.; DE MORI, C.; GARAGORRY, F. L.; CHAIB FILHO, H. **Dinâmica da produção de trigo no Brasil no período de 1975 a 2003**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 40 p. Disponível:
<http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp36.htm>. Acessado em 12 fev. 2013.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS (ITCG). **Mapas de solos**. 2013. Disponível em:
<<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=47>>. Acessado em 13 mai. 2013.

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

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese Ed., 2011, 604p. ISBN (978-85-60507-06-1).

JIANG, Z.; HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833–3845, 2008.

JINLING, Z., DONGYAN, Z., JUHUA, L., YINGYING, D., HAO, Y., WENJIANG, H.; Characterization of the rice canopy infested with brown spot disease using field hyperspectral data. **Wuhan University Journal of Natural Sciences**, v. 17, n.1, p. 086 – 092, 2012.

LARGE, E. C. Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes scale. **Plant Pathology**, v. 3, p. 128-129, 1954.

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

LIMA, M. I. P. M. **Métodos de amostragem e avaliação de giberela usados na Embrapa Trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 17 p. Disponível em:<http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_do27.htm>. Acessado em: 16 jun 2013.

MARIN, F. R. O clima e a eficiência da produção agrícola no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas, 2005. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/XIVCBA/CBAgro2005_14.pdf>. Acessado em: 20 fev. 2013

MARTINS, A. N.; ORTOLANI, A. A. Estimativa de produção de laranja valência pela adaptação de um modelo agrometeorológico. **Bragantia**, v. 65, n. 2, p. 355-361, 2006.

MARTINS, T.D. Trigo. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; SESTARI, R.A. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. São Paulo: Editora Agronomica Ceres, p. 176 - 187, 2008. ISBN (978-85-318-0049-8).

MILLER, D.; McCARTHY, J.; ZALZESKI, A. A fresh approach to agricultural statistics: data mining and remote sensing. In: JOINT STATISTICAL MEETINGS, 2009, Washington, DC. **Proceedings...** Washington: The Survey Research Methods, Government Statistics, and Social Statistics Sections, 2009.

MONTEIRO, J.E.B.A.; SENTELHAS, P.C.; CHIAVEGATO, E.J.; GUISELINI, C.; SANTIAGO, A.V.; PRELA, A. Estimación da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, v. 64, n.1, p. 15-24, 2005.

MORAES, A. V.C; CAMARGO, M. B. P.; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M.A.C.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de

estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, v. 57, n. 2, p. 393-406, 1998.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2003. 307 p. ISBN (978-85-7269-381-3).

MORI, C.; IGNACZAK, J. C. Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (eds.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. Cap. 3, p. 41-76. ISBN (978-85-7574-029-3).

NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G.R.; SCHMUGGE, T.J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, Toulouse, France. **Proceedings...** Toulouse, 2003.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 308, 2010. ISBN (978-85-212-0540-1).

PICINI, A. G.; CAMARGO, M. B. P.; ORTOLANI, A. A.; GALLO, P. B. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, v. 58, n. 1, p. 157-170, 1999.

PINO, F.A. Estimativa subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, v.31, p.55-58, 2001.

PINTO, L. I. C, COSTA, M. H., DINIZ, L. M. F., SEDIYAMA, G. C., PRUSKI, F.F. Comparação de produtos de radiação solar incidente à superfície para a América do Sul. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 469-478, 2010.

PIRES, R.C.M.; FOLEGATTI, M.V.; PASSOS, F.A.; AMBROSANO, G.M.B.; MINAMI, K. Profundidade efetiva do sistema radicular do morangueiro sob diferentes coberturas do solo e níveis de água. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n. 4, p. 793-799, 2000.

PIRES, J.L.F; CUNHA, G.R; DALMAGO, G.A.; PASINATO, A.; SANTI, A.; PEREIRA, P.R.V.S.; SANTOS, H.P.; SANTI, A.L. Integração de práticas de manejo no sistema de produção de trigo. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da (Ed.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. Cap. 4, p. 77-114. ISBN (978-85-7574-029-3).

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2010. 127 p. ISBN (978-85-60507-02-3).

QUINLAN, R. Book Review: C4.5: programs for machine learning. **Machine Learning**, v.16, p.235-240, 1993.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

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.

RIZZI, R.; RISSO, J.; EPIPHANIO, R.D,V.; FORMAGGIO, A.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; FERNANDES, S.L. Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 387 - 394.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. 226-234, 2005.

ROBERTSON, G.W. **Guidelines on crop-weather models**. Geneve: World Meteorological Organization, 1983, 115p. (World Climate Application Programmer, 50).

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M.C.C.; COSTENARO, E.R.; SANA, D. Ecofisiologia de trigo: bases para elevado rendimento de grãos. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (Ed.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. Cap. 5, p. 115-134. ISBN (978-85-7574-029-3).

RODRIGUES, O.; HAAS, J. C.; COSTENARO, E. R. Manejo de trigo para alta produtividade II: caracterização ontogenética. **Revista Plantio Direto**, v.20, n. 125, p. 10-13, 2010.

ROSA, V.G.C. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do estado de Minas Gerais**. 2007.143p. (INPE-14791-TDI/1234). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.12.19.35>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

ROSA, V. G. C.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L.M. Uso de Dados Orbitais na estimativa de Produtividade de Culturas Agrícolas. In: MOREIRA, M. A. (ed.). **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: Editora UFV, 2011. 422 p. ISBN (978-85-7269-381-3).

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C..
Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 371 p., 1974.

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

RUDORFF, B F T.; BATISTA, G. T. Resposta espectral da cana de açúcar através de dados multitemporais do MSS do Landsat-4. In: REUNION PLENARIA SELPER, 4., 1984, Santiago, CL. **Memoria final...** 1984. p. 171-181. (INPE-3474-PRE/717).

RUDORFF, B. T. F.; BATISTA, G. T. **Relatório da fase II do Projeto ESTIMA - Dados Landsat-TM e agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura do trigo ao nível de propriedades rurais.** São José dos Campos: INPE, 50 p., 1989 (INPE-4782-RPE/582).

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

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO (SEAB). **Núcleos regionais.** 2011. Disponível em:
<http://www.agricultura.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=73>,
acessado em 12 jun. 2013.

SANCHES, I.D.A, EPIPHANIO, J.C.N., FORMAGGIO, A.R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Agricultura em São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.

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

SCHEEREN, P.L.; CARVALHO, F.I.F; FEDERIZZI, L.C. Respostas do trigo aos estresses causados por baixa luminosidade e excesso de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n. 5, p. 605-619, 1995.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, n.1, p.16-20, 1991.

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

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

VALERIANO, M. M. **Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo Sail.** São José dos Campos: INPE, 1992. 127p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.23.01.26>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

VIEIRA, M. A. **Análise de imagem orientada a objeto e mineração de dados aplicadas ao mapeamento da cultura da cana-de-açúcar.** São José dos Campos: INPE, 2010. 86p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37A6SQ8>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

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

WARDLAW, I. F. MONCUR, L. The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 22, n.3, p 391-397, 1995.

WITHERS, B.; VIPOND, S. **Irrigação: projeto e prática.** Sao Paulo: Nobel, 1977. 339p. ISBN (85-7269-242-8).

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 84, n.3, p. 471-475, 2003.

ZHANG, X.; BRUCE, A.; TAN, B.; HUANG, D.; MYNENI, R. Potential monitoring of crop production using a satellite based climate variability impact index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, n 3-4, p. 344–358, 2005.