

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DO TRIGO (CULTIVAR
IAC 24 - TUCURUÍ), COMPORTAMENTO ESPECTRAL E
UTILIZAÇÃO DE IMAGENS NOAA-AVHRR**

**POR
EMÍLIA HAMADA**

**CAMPINAS, SP
Dezembro de 2000**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DO TRIGO (CULTIVAR
IAC 24 - TUCURUÍ), COMPORTAMENTO ESPECTRAL E
UTILIZAÇÃO DE IMAGENS NOAA-AVHRR**

**POR
EMÍLIA HAMADA**

Orientador: Prof. Dr. HILTON SILVEIRA PINTO

**Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Agrícola, Universidade
Estadual de Campinas, para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Agrícola,
Área de Concentração: Água e Solo.**

**CAMPINAS, SP
Dezembro de 2000**

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

H17d	<p>Hamada, Emília</p> <p>Desenvolvimento fenológico do trigo (cultivar IAC 24 – Tucuruí), comportamento espectral e utilização de imagens NOAA-AVHRR / Emília Hamada. --Campinas, SP: [s.n.], 2000.</p> <p>Orientador: Hilton Silveira Pinto.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Sensoriamento remoto. 2. Trigo - Desenvolvimento. 3. Satélites meteorológicos. 4. Análise espectral. 5. Espectro solar. I. Pinto, Hilton Silveira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.</p>
------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dedico esta Tese
aos meus pais Yutaka e Massako, por uma vida
inteira de dedicação, amor e imenso esforço na
formação das filhas;
às minhas irmãs Eliana e Celina, pelo amor e apoio
em todos os momentos; e
aos meus sobrinhos Andrea, Beatriz e Rafael, pelos
ensinamentos da pureza, do amor e da paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições os esforços e a cooperação, possibilitando que esta Tese fosse realizada.

Inicialmente, agradeço ao Professor Hilton Silveira Pinto, que me orientou neste trabalho, pelo apoio, paciência e encorajamento ao longo desses anos de tese.

Agradeço ao Pesquisador Jurandir Zullo Junior, pela amizade e valiosa colaboração na coleta e no processamento dos dados e pelas críticas e sugestões ao trabalho.

Meus agradecimentos à Pesquisadora Maria Helena de Almeida Mello, pela amizade, incentivo e importante apoio na metodologia estatística.

Ao Engenheiro Agrônomo Carlos Alberto Soares de Almeida, pela amizade e preciosa colaboração nas campanhas de coleta dos dados.

Agradeço ao Projeto de Cooperação “Climatological and Hydrological Determinants of Agricultural Production in South-America – Remote Sensing and Numerical Simulation”, financiado pela União Européia, o suporte de recursos na realização do trabalho.

Ao Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura, pelas facilidades de infra-estrutura, equipamentos e recursos humanos para realizar o trabalho. Agradeço ao Giam, Edilene, Claudir, Wilson e Zezinho pela ajuda recebida.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de qualificação profissional e à sua Coordenadoria de Pós-Graduação, pelo apoio e atenção recebidos, especialmente a Ana Paula e Marta.

À Cooperativa Agropecuária Holambra II, na pessoa do Engenheiro Agrônomo Guido Sanches, o apoio recebido na escolha do local do experimento de campo, e ao Sr. Theodorus W. Stuart, proprietário da Fazenda Alto do Rincão, a colaboração, permitindo-nos a realização do estudo em sua área agrícola.

Agradeço aos membros da Comissão Julgadora de Defesa de Tese e da Banca de Qualificação, as contribuições pelas leituras críticas e sugestões ao trabalho: ao Pesquisador Antônio Roberto Formaggio (INPE), Pesquisador Eduardo Delgado Assad (EMBRAPA), Professor José Teixeira Filho (UNICAMP), Pesquisador Jurandir Zullo Junior (UNICAMP), Pesquisadora Maria Conceição Peres Young Pessoa (EMBRAPA), Pesquisador Pedro Luiz Donzeli (IAC) e Professor Sylvio Luís Honório (UNICAMP).

Aos queridos amigos Margarete, Chris, Elaine, Cidinha, Nilson, Ritinha, Julieta e Túlio, pelo carinho, incentivo e, principalmente, a camaradagem nos momentos difíceis, ao longo desses anos de tese.

De forma muito especial, presto homenagem à memória do Professor Adibe Jorge Roston, pelo exemplo de mestre: sua sabedoria, honestidade e humanidade. Agradeço pelo apoio e incentivo em minha formação profissional. Seus ensinamentos e modelo estiveram sempre presentes durante a elaboração deste trabalho e estarão guardados em meu coração.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Considerações gerais sobre o trigo	3
2.2. Desenvolvimento da planta	8
2.3. Características espectrais da vegetação	14
2.4. Indicadores espectrais do estado da vegetação	21
2.5. Sistema NOAA-AVHRR	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Área de estudo e condução da cultura	31
3.2. Medidas físicas do ambiente	35
3.3. Datas de campanha	35
3.4. Avaliação do desenvolvimento da cultura	37
3.4.1. Dados biofísicos da cultura	39
3.4.2. Dados espectrais	43
3.4.2.1. Radiometria de campo	43
3.4.2.2. NOAA-AVHRR	48
3.5. Análise comparativa entre dados biofísicos e espectrais	52

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Dados meteorológicos e do solo	53
4.2. Dados biofísicos	56
4.2.1. Altura	59
4.2.2. Densidade de plantas	60
4.2.3. Número de folhas	61
4.2.4. Fitomassa	62
4.2.4.1. Massa fresca	62
4.2.4.2. Massa seca	65
4.2.5. Área foliar e índice de área foliar	69
4.3. Dados de radiometria de campo	72
4.4. Relações entre variáveis biofísicas e espectrais de campo	78
4.5. Dados NOAA-AVHRR	84
5. CONCLUSÕES	91
6. ANEXOS	93
Anexo A – Variáveis biofísicas	93
Anexo B – Modelos de ajuste e equações das variáveis biofísicas	99
Anexo C – Análise de variância e Teste F dos modelos das variáveis biofísicas	113
Anexo D – Teste de Kolmogorov-Smirnov dos modelos das variáveis biofísicas	119
Anexo E – Espectros de fator de reflectância do trigo	121
Anexo F – Espectro de fator de reflectância da placa de referência	129
Anexo G – Variáveis espectrais	131
Anexo H - Radiação solar direta	135
Anexo I - Fotografias da área de estudo	139
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

LISTA DE FIGURAS

		Página
2.1	Reflectância espectral de dossel de vegetação e solo descoberto.	14
2.2	Evolução das propriedades ópticas de uma folha de trigo em função do comprimento de onda.	16
3.1	Localização do município de Paranapanema – SP, área de estudo, e do município de Campinas –SP, onde situa a estação de recepção de imagens do satélite NOAA. Imagem em destaque: imagem NOAA-14/AVHRR-LAC/HRPT, setorizada para o Estado de São Paulo, canal 2, de 14 de agosto de 1995, 17:09 GMT.	32
3.2	Localização da área de estudo. Imagem Landsat 5 TM, combinação falsa cor 4-5-3 (RGB), de 13 de agosto de 1995.	33
3.3	Fluxograma da metodologia.	38
3.4	Dimensões do conjunto tubo+receptor hemisférico.	45
3.5	Espectroradiômetro adaptado em estrutura metálica utilizado para as determinações de fator de reflectância.	46
4.1	Temperatura e umidade relativa médias do ar, precipitação, irrigação e umidade do solo no período de abril a agosto de 1995.	54
4.2	Estádios de desenvolvimento do trigo na escala de Feekes e datas correspondentes das campanhas de campo.	58
4.3	Altura (cm) do trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	59
4.4	Número de plantas por metro quadrado do trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	60

4.5	Número de folhas verdes por planta de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	61
4.6	Massa fresca média da planta (g/m^2) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	63
4.7	Massa fresca média por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	64
4.8	Massas frescas médias de folhas verdes (g/planta) e da parte aérea por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	65
4.9	Massa seca média da planta (g/m^2) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	66
4.10	Massa seca média por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	67
4.11	Massas secas médias de folhas verdes (g/planta) e da parte aérea por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	68
4.12	Área foliar média por planta ($\text{cm}^2/\text{planta}$) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	70
4.13	Índice de área foliar médio (cm^2/cm^2) de trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental.	71
4.14	Espectros de fator de reflectância do trigo, cv. IAC-24 – Tucuruí, na estação de crescimento de 1995, ao longo do ciclo de desenvolvimento.	73
4.15	Fator de reflectância nos canais 1 e 2 do NOAA-AVHRR do trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental.	74
4.16	Índices de vegetação NDVI, TVI e RATIO utilizando os canais 1 e 2 do NOAA-AVHRR do trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental.	76

4.17	Coefficientes de determinação (R^2) das variáveis biofísicas massa fresca de folhas verdes por planta e índice de área foliar com relação ao NDVI ao longo do estágio fenológico da cultura.	83
4.18	Fator de reflectância no canal 1 do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.	86
4.19	Fator de reflectância no canal 2 do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.	86
4.20	Índice de vegetação NDVI do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.	87
4.21	Índice de vegetação TVI do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.	87
4.22	Índice de vegetação RATIO do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.	88
E.1	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 38 dias após o plantio (DAP), no perfilhamento – estágio fenológico 5 da escala de Feekes, média de 15 observações.	122
E.2	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 46 dias após o plantio (DAP), no alongamento – estágio fenológico 6 da escala de Feekes, média de 17 observações.	123
E.3	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 68 dias após o plantio (DAP), no emborrachamento – estágio fenológico 10 da escala de Feekes, média de 5 observações.	124
E.4	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 74 dias após o plantio (DAP), no espigamento – estágio fenológico 10.2 da escala de Feekes, média de 15 observações.	125
E.5	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 102 dias após o plantio (DAP), na maturação – início – estágio fenológico 11.2 da escala de Feekes, média de 25 observações.	126

E.6	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 121 dias após o plantio (DAP), na maturação – média – estágio fenológico 11.3 da escala de Feekes, média de 20 observações.	127
E.7	Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 135 dias após o plantio (DAP), na maturação – colheita – estágio fenológico 11.4 da escala de Feekes, média de 24 observações.	128
F.1	Espectro de fator de reflectância da placa de referência de BaSO₄, média de 10 observações.	130
H.1	Radiação solar direta aos 38 dias após o plantio (DAP), média de 4 observações.	136
H.2	Radiação solar direta aos 102 dias após o plantio (DAP), média de 3 observações.	137
I.1	Área de estudo no dia 22/06/1995, com o trigo aos 68 dias após o plantio, no estágio de emborrachamento.	140
I.2	Área de estudo no dia 28/06/1995, com o trigo aos 74 dias após o plantio, no início do estágio de espigamento.	140
I.3	Área de estudo no dia 14/08/1995, com o trigo aos 121 dias após o plantio, no estágio de maturação média.	141
I.4	Área de estudo no dia 28/08/1995, com o trigo aos 135 dias após o plantio, no estágio de maturação final ou ponto de colheita.	141

LISTA DE TABELAS

	Página
2.1 Evolução da produção do trigo, em toneladas, nos principais países produtores, mais a Argentina, Brasil, Mundo e América do Sul, de 1995 a 2000.	5
2.2 Evolução da área, produção e produtividade do trigo no Brasil, de 1995 a 2000.	6
2.3 Evolução da importação de trigo pelo Brasil, de 1995 a 2000.	6
2.4 Evolução da área, produção e produtividade do trigo no Estado de São Paulo, nas safras de 1995/96 a 1999/00.	7
2.5 Estádios de desenvolvimento de cereais – escala de Feekes.	10
2.6 Canais espectrais do sensor AVHRR (NOAA-9 e NOAA-14).	26
3.1 Datas das campanhas: dia do ano, dias decorridos no ano (DDA) e dias após o plantio (DAP), no período de maio a agosto de 1995.	36
3.2 Dados de passagens pré-selecionadas do satélite NOAA sobre a antena de recepção localizada em Campinas, SP.	49
4.1 A data, dias decorridos no ano (DDA), dias após o plantio (DAP) e o correspondente estágio fenológico da cultura, nas 7 campanhas de campo.	57
4.2 Coeficientes de correlação linear simples (R) entre variáveis biofísicas e espectrais do trigo nas datas de campanha.	80
4.3 Passagens selecionadas do satélite NOAA-14.	84

4.4	Quantidades de vapor d'água e de ozônio e espessura ótica dos aerossóis, dados de entrada para a correção atmosférica.	85
4.5	Dados espectrais obtidos da radiometria de campo e do satélite NOAA-AVHRR.	85
A.1	Altura média da planta, em cm, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	94
A.2	Número médio de plantas por m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	94
A.3	Número médio de folhas verdes por planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	94
A.4	Massa fresca média da parte aérea da planta, em g/m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	95
A.5	Massa fresca média da parte aérea da planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	95
A.6	Massa fresca média de folhas verdes por planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	95
A.7	Massa seca média da parte aérea da planta, em g/m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	96
A.8	Massa seca média da parte aérea da planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	96
A.9	Massa seca média de folhas verdes por planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	96
A.10	Área foliar média, em cm²/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	97
A.11	Índice de área foliar médio, em cm²/cm², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	97
B.1	Modelos de ajuste, equações e campo dos números reais em que as funções não são definidas ou pontos em que os ajustes não são realizados.	100

B.2	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ALTURA (cm), em função de dias após plantio (DAP).	101
B.3	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica NÚMERO DE PLANTAS POR M², em função de DAP.	102
B.4	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica NÚMERO DE FOLHAS VERDES POR PLANTA, em função de DAP.	103
B.5	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em função de DAP.	104
B.6	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP.	105
B.7	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP.	106
B.8	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em função de DAP.	107
B.9	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP.	108
B.10	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP.	109
B.11	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ÁREA FOLIAR DE FOLHAS VERDES (cm²/planta), em função de DAP.	110
B.12	Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (cm²/cm²), em função de DAP.	111

C.1	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica ALTURA (cm), em função de DAP.	114
C.2	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica NÚMERO DE FOLHAS VERDES POR PLANTA (cm), em função de DAP.	114
C.3	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m^2), em função de DAP.	115
C.4	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP.	115
C.5	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA FRESCA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP.	116
C.6	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m^2), em função de DAP.	116
C.7	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP.	117
C.8	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica MASSA SECA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP.	117
C.9	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica ÁREA FOLIAR DE FOLHAS VERDES ($\text{cm}^2/\text{planta}$), em função de DAP.	118
C.10	Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (cm^2/cm^2), em função de DAP.	118
D.1	Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov (K.S.) de verificação da adequação dos modelos escolhidos das variáveis biofísicas.	120

E.1	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 38 dias após o plantio.	122
E.2	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 46 dias após o plantio.	123
E.3	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 68 dias após o plantio.	124
E.4	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 74 dias após o plantio.	125
E.5	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 102 dias após o plantio.	126
E.6	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 121 dias após o plantio.	127
E.7	Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 135 dias após o plantio.	128
F.1	Fator de reflectância médio da placa de referência de BaSO₄.	130
G.1	Reflectância no canal 1 (580 – 680 nm) do AVHRR ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	132
G.2	Reflectância no canal 2 (725 – 1100 nm) do AVHRR ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	132
G.3	Razão (RATIO) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	132
G.4	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	133
G.5	Índice de Vegetação Transformado (TVI) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo.	133
H.1	Radiação solar direta aos 38 dias após o plantio.	136
H.2	Radiação solar direta aos 102 dias após o plantio.	137

RESUMO

No presente trabalho foram avaliados o desenvolvimento agrônômico do trigo (*Triticum aestivum* L.), cultivar IAC-24 - Tucuruí e a evolução sazonal de suas características espectrais. O estudo foi realizado em uma área comercial irrigada, no município de Paranapanema, SP. Sete campanhas foram realizadas na estação de crescimento de 1995, entre os meses de maio a agosto, para a coleta dos dados. Os parâmetros biofísicos foram: altura, densidade de plantas, número de folhas, fitomassa (massas fresca e seca da parte aérea da planta e de folhas), área foliar e índice de área foliar (IAF). Os dados espectrais compreenderam a radiometria de campo e as imagens do satélite NOAA-AVHRR. Foram obtidos os espectros de fator de reflectância e posteriormente foram calculados os valores médios de fator de reflectância referentes aos canais 1 (580-680nm) e 2 (725-1.100nm) do NOAA e os índices de vegetação RATIO, NDVI e TVI. As imagens NOAA-AVHRR foram setorizadas e realizadas a calibração radiométrica e a correção atmosférica. As variáveis biofísicas e espectrais obtidas da radiometria de campo foram correlacionadas entre si, para cada estágio de desenvolvimento. Posteriormente, as variáveis espectrais obtidas da radiometria de campo e das imagens foram comparadas. A máxima reflectância na banda do infravermelho próximo foi observada no início do processo de espigamento, quando também foi observado o máximo IAF. Os índices de vegetação RATIO, NDVI e TVI tiveram comportamentos semelhantes, com os valores máximos que ocorreram no início do estágio de espigamento, coincidindo com o máximo de IAF. As relações entre as variáveis biofísicas e espectrais foram influenciadas pelo estágio de desenvolvimento da cultura. As melhores correlações foram obtidas entre o espigamento e a maturação média. A menor diferença entre os dados orbitais e os de

campo foi obtida no TVI, com 4,5% de diferença, média das quatro datas, seguido do NDVI. O índice de vegetação RATIO foi o que apresentou a maior diferença.

ABSTRACT

The agronomic development of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar IAC-24 - Tucuruí and the seasonal evolution of its spectral characteristics were evaluated under field conditions. The study was carried out at an irrigated commercial farm, located in the municipality of Paranapanema, SP. Field experimental observations were collected during the 1995 growing station, from May to August, in seven data of campaign. Biophysical parameters included canopy height, density of plant, number of leaves, phytomass (fresh and dry weight of aerial part of plant and of leaves), leaf area, and leaf area index (LAI). The spectral data included the field radiometry and the NOAA-AVHRR satellite images. Reflectance factor spectra of seven data were measured and then the mean values of the reflectance factor between 580 and 680nm (channel 1) and from 725 to 1,100nm (channel 2) of NOAA, and RATIO, NDVI, and TVI vegetation indexes were calculated. The NOAA-AVHRR images were sectorized and radiometric calibration and atmospheric correction were made. Spectral variables from field radiometry were correlated to biophysical variables in each growth stage. Afterward field spectral variables were compared to orbital spectral variables. Maximum reflectance in the near infrared band was reached at beginning of heading process, when maximum LAI was also observed. The vegetation indexes of RATIO, NDVI and TVI had similar behaviours with the maximum values occurred at beginning of heading stage such as it was for maximum LAI. The relationships between biophysical and spectral variables were dependent of growth stage of the crop. The best correlations were obtained from heading through middle maturity. The lower difference between spectral and field data was obtained for TVI, with difference of

4.5%, average of four data values, followed by NDVI. Higher difference was observed to RATIO vegetation index.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto orbital constitui um importante sistema de aquisição de informações das superfícies naturais por sua capacidade de integração espacial, através de sua visão sinóptica, e pela periodicidade de obtenção de dados-imagem gerados por sensores à bordo de satélites. A utilização das imagens de satélite é cada vez mais freqüente, com os diversos sistemas orbitais disponíveis atualmente, o que possibilita a obtenção de dados da superfície terrestre em diferentes características temporal e espacial (local, regional ou global). As aplicações são inúmeras em estudos da superfície vegetada, como por exemplo no mapeamento, na identificação das diferentes coberturas do solo e na estimativa da produção.

O princípio básico utilizado no sensoriamento remoto é o de que todos os corpos refletem ou emitem fluxos de energia sob a forma de radiação eletromagnética e que a variação relativa de energia refletida ou emitida, em função do comprimento de onda, constitui o que é denominado “comportamento”, “característica” ou “padrão de resposta” espectral do objeto considerado. O conhecimento da medida da reflectância espectral de qualquer superfície em seu entorno natural é fundamental como base quantitativa em estudos de modelos de refletividade, que relacionam atributos biofísicos e características espectrais.

Os satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), embora de vocação meteorológica, vêm sendo muito utilizados no monitoramento da vegetação em escala regional e global e, mais recentemente, estudos vêm sendo realizados enfocando o seu uso no monitoramento agrícola. Seu radiômetro AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) inclui um canal na banda

correspondente ao vermelho e outro na banda do infravermelho próximo, que são os adotados em estudos de cobertura vegetal. Devido à sua frequência de imageamento, 2 a 4 vezes por dia de um mesmo local, tem-se aumentada a probabilidade de obtenção de dados-imagem em boas condições ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura comercial.

A cultura estudada foi o trigo (*Triticum aestivum* L.), considerado um alimento básico da população brasileira. O país é tradicionalmente um importador de trigo em grão, atendendo à ordem de 75% do consumo (dados de 1996 a 2000), segundo CSBPT¹ (2001). A América do Sul é responsável por 3% da produção mundial e o Brasil ocupa o segundo lugar na América do Sul, participando com 12,4% do total sul-americano, enquanto a Argentina lidera com cerca de 73,2%, média anual de 1995 a 2000, segundo FAO (2000; 2001).

A hipótese do presente trabalho é a de que as características espectrais de uma superfície vegetada podem ser utilizadas para inferir seus atributos biológicos, possibilitando que as informações espectrais sejam obtidas remotamente, através de sensores à bordo de satélites e sejam utilizadas no monitoramento do crescimento da planta e em modelos de produtividade.

A área teste está localizada no município de Paranapanema, sudoeste do Estado de São Paulo. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o desenvolvimento agrônômico do trigo e relacioná-lo ao comportamento espectral do dossel de trigo ao longo de seu ciclo de crescimento, obtido de medidas de campo e de informações de dados-imagem do satélite NOAA-AVHRR.

¹ CSBPT - Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O TRIGO

O trigo é uma gramínea de ciclo anual, sendo uma das primeiras espécies a ser cultivada pelo homem. Acredita-se que a utilização do trigo na alimentação humana data de cerca de 17 mil anos (SILVA et al., 1996). Esse cereal é originário de clima frio e através de sucessivos trabalhos de melhoramento e adaptação de cultivares às variações fototérmicas, tem sido explorado em quase todas as partes do Planeta. Dentre as culturas alimentícias, é a que apresenta a maior área plantada, com cerca de 20% da área cultivada no mundo, graças à sua grande aceitação e ao seu valor nutritivo. O grão de trigo é uma excelente fonte de energia (carboidratos), proteína e fibras, além de importante fonte de ferro e vitaminas B1 e B2. Devido à sua versatilidade, é utilizado como base de inúmeros alimentos, tais como pães, bolos, massas

Segundo FAO (2000; 2001), a produção média mundial de trigo é de 583 milhões de toneladas, aproximadamente, sendo a China o maior produtor, com cerca de 18,9% do total, seguida dos países da União Européia, com 16,7%. Individualmente, a Índia detém o segundo lugar e em situação bem próxima os Estados Unidos, seguidos da Rússia, Canadá e Austrália, que detém em torno de 25,3% da produção mundial, considerando-se os valores médios anuais do período de 1995 a 2000 (Tabela 2.1).

A América do Sul é responsável por, aproximadamente, 3% da produção mundial, equivalente a 18,5 milhões de toneladas, entre 1995 a 2000, liderada pela

Argentina com cerca de 73,2% do total sul-americano. O Brasil está em segundo lugar com 12,4% (Tabela 2.1). A diferença de volume de produção entre os países é consequência principalmente da área cultivada de trigo na Argentina, que é quatro vezes maior que a do Brasil, ou seja, de 5.532 mil hectares, em contraposição a 1.390 mil hectares da área brasileira.

O País cultivou, no período de 1995 a 2000, uma área média de 1,41 milhão de hectares, com produção média de 2,3 milhões de toneladas, aproximadamente (Tabela 2.2).

O Brasil é tradicionalmente um país importador de trigo em grão e apresenta elevada dependência externa no abastecimento do cereal, da ordem de 75% para o atendimento à demanda, no período compreendido entre 1996 a 2000 (CSBPT, 2001). Nesse período o consumo médio anual foi de 9.324 mil toneladas e o maior exportador de trigo para o País foi a Argentina.

Segundo TEIXEIRA & DÁVALOS (1998), o País esteve próximo da auto-suficiência em 1987, com cerca de 91% do suprimento interno garantido pela produção nacional e, a partir de então, tem-se verificado um rápido e contínuo processo de declínio do setor produtivo, com redução na área cultivada de trigo e conseqüente queda de sua produção, em decorrência da falta de uma política governamental de incentivo ao plantio e de garantia de preços compatíveis com os custos de produção.

O trigo cultivado comercialmente no Brasil pertence à espécie *Triticum aestivum*, que também é produzido em quase todas as partes do mundo, pela sua facilidade de adaptação aos ambientes mais diversos e por apresentar altos rendimentos e grande valor para a panificação. Considerado um alimento básico da população brasileira, as maiores produções do trigo estão nos Estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Santa Catarina e Minas Gerais. O Estado de São Paulo apresenta produção de 29,3 mil toneladas (1,3%, aproximadamente, da produção nacional), ocupando 17,9 mil hectares e rendimento de 1.651kg/ha, considerando as safras de 1995/96 a 1999/00 (Tabela 2.4).

TABELA 2.1 – Evolução da produção do trigo, em toneladas, nos principais países produtores, mais a Argentina, Brasil, Mundo e América do Sul, de 1995 a 2000

Países	Ano						Média
	1995	1996	1997	1998	1999	2000*	
Argentina	9.445.000	15.914.000	15.000.000	11.500.000	13.000.000	16.500.000	13.559.833
Austrália	16.566.200	22.924.300	19.224.000	21.122.000	21.269.000	19.550.000	20.109.250
Brasil	1.534.150	3.359.447	2.440.863	2.231.630	2.348.250	1.895.130	2.301.578
Canadá	24.989.000	29.802.000	24.280.000	24.076.300	25.923.000	26.804.100	25.979.067
China	102.211.429	110.569.193	123.290.085	109.726.085	114.400.085	99.370.088	109.927.828
EUA	67.117.000	62.000.000	67.523.000	69.327.000	62.812.000	60.512.000	64.881.833
Índia	65.767.400	62.097.400	69.274.704	65.907.000	71.007.000	74.251.000	68.050.751
Rússia	30.118.660	34.916.680	44.257.720	27.011.880	31.000.000	indisponível	33.460.988
União Européia	87.712.330	99.724.545	94.655.910	103.777.401	97.629.500	101.112.068	97.435.292
América do Sul	13.307.213	22.009.744	20.360.270	16.511.574	18.175.364	20.783.489	18.524.609
Mundo	550.473.587	584.686.696	612.786.264	589.325.448	583.918.588	576.317.042	582.917.938

Fontes: FAO (2000) – dados de 1995 a 1999 e *FAO (2001) – dados de 2000.

TABELA 2.2 – Evolução da área, produção e produtividade do trigo no Brasil, de 1995 a 2000

Ano	Área colhida (mil ha)	Produção (mil t)	Produtividade (kg/ha)
1995	993,9	1.534,1	1.544
1996	1.820,0	3.359,4	1.846
1997	1.505,7	2.440,8	1.621
1998	1.422,8	2.231,6	1.568
1999	1.252,3	2.435,7	1.945
2000*	1.468,1	1.658,4	1.130
Média	1.410,5	2.276,7	1.609

Fontes: MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (2001) – dados de 1995 a 1999 e *CONAB² (2001) – dados de 2000.

TABELA 2.3 – Evolução da importação de trigo pelo Brasil, de 1995 a 2000

Ano	Importação (mil t)
1995	157,6
1996	7.706,6
1997	4.765,4
1998	6.713,7
1999	7.082,4
2000*	7.522,7
Média	5.658,1

Fontes: MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (2001) – dados de 1995 a 1999 e *CONAB (2001) – dados de 2000.

² CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

TABELA 2.4 – Evolução da área, produção e produtividade do trigo no Estado de São Paulo, nas safras de 1995/96 a 1999/00

Ano-safra	Área colhida (ha)	Produção (t)	Produtividade (kg/ha)
1995/96	26.308	33.040	1.265
1996/97	12.379	21.540	1.740
1997/98	16.878	34.221	2.028
1998/99	20.100	41.040	2.042
1999/00*	14.010	16.530	1.179
Médias	17.935	29.274	1.651

Fontes: FUNDAÇÃO SEADE³ (2001) – dados de 1995/96 a 1998/99 e *IEA⁴ (2001) – dados de 1999/00.

Nas condições do Estado de São Paulo, o trigo é plantado nos períodos de outono e inverno. Excetuando-se as áreas compreendidas pela faixa do trigo, região sul e Vale do Paranapanema, nas demais regiões do Estado é necessário o emprego da prática da irrigação no inverno, devido à acentuada deficiência hídrica (CAMARGO & FELÍCIO, 1990). Ainda segundo esses autores, o ciclo da cultura apresenta duração média de 90 a 110 dias no trigo de sequeiro e no irrigado de 110 a 130 dias e é utilizado tradicionalmente em rotação com outras culturas de verão (tais como, soja, feijão, milho e arroz); e as recomendações para a época de plantio no Estado de São Paulo estabelecem, em geral, a semeadura entre meados de março a abril, sendo tolerado até maio e junho, em função principalmente das condições climáticas (temperatura, luz e água) da região.

ZULLO et al. (1999), definiram a metodologia do zoneamento de riscos climáticos para o trigo de sequeiro no Estado de São Paulo, que integra o Programa de Zoneamento Agrícola do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O

³ SEADE – Sistema Estadual de Análise de Dados

⁴ IEA – Instituto de Economia Agrícola

estudo foi realizado objetivando identificar regiões com menor risco climático para a cultura, levando-se em consideração duas épocas de plantio (precoce e normal) e três tipos de solo (arenoso, médio e argiloso), no período de 21 de março a 20 de maio.

2.2. DESENVOLVIMENTO DA PLANTA

A planta de trigo possui de seis a nove folhas, cada uma composta de bainha e lâmina foliar, dispostas de forma alternada (SILVA et al., 1996). A haste ou colmo é cilíndrico e oco, possuindo de seis a nove entrenós e cada nó abaixo do solo produz raízes adventícias, sendo as folhas produzidas a partir dos nós acima do solo (SOARES SOBRINHO & SOUZA, 1983). O sistema radicular é o do tipo fasciculado ou cabeleira, sendo originado a partir da semente (raízes seminais ou temporárias, importantes até a fase de perfilhamento) e da região da coroa (raízes permanentes e definitivas), segundo SILVA et al. (1996). O colmo termina numa inflorescência que é a espiga.

Os estádios de crescimento de uma planta são geralmente definidos por uma escala. Nos cereais, a escala mais largamente empregada é a escala de Feekes, modificada por LARGE (1954). Nesse trabalho, o autor cita que a escala foi originalmente feita para o trigo por Feekes (1941)⁵ e posteriormente foram incorporadas notações do Dr. F. Earnshaw, do *National Institute of Agricultural Botany*, e ainda ilustrações do diagrama dos estádios de desenvolvimento, desenhadas pelo autor, resultando em uma escala aplicável para o trigo, aveia, cevada e centeio.

Na escala de Feekes, modificada por LARGE (1954), o ciclo de crescimento do trigo é dividido em quatro fases de desenvolvimento: perfilhamento, alongamento, espigamento e maturação (Tabela 2.5). Essa escala reconhece onze principais estádios de crescimento, iniciando com o aparecimento da primeira folha verdadeira e

⁵ FEEKES, W. De tarwe en haar milieu. **Vers. XVII Tech. Tarwe Comm. Groningen**, p.560-561. 1941.

terminando com a maturação dos grãos. Os estádios de espigamento e maturação são subdivididos para maior detalhe.

A ocorrência dos estádios de desenvolvimento não está sujeita à variedade, à época de plantio e às condições edafoclimáticas do local. No entanto, esses fatores afetam as datas nas quais cada estágio ocorre, a duração de cada estágio e, conseqüentemente, a duração do ciclo de desenvolvimento da planta. Por essa razão, existe uma variação entre os autores, na literatura, das datas de ocorrência e duração das fases de desenvolvimento. Porém, baseando-se nas informações de CAMARGO & FELÍCIO (1990), SOARES SOBRINHO & SOUZA (1983) e SILVA et al. (1996), para as variedades nacionais de trigo, foram obtidas, de forma abrangente, as faixas prováveis de tempo decorridos dentro de cada estágio, apresentadas a seguir:

A primeira fase, o **perfilhamento**, inicia-se a partir dos 15 a 20 dias após o plantio, com o aparecimento dos primeiros perfilhos. Esta fase tem duração média entre 15 e 25 dias e compreende os estádios de desenvolvimento 1 a 5.

A segunda fase, o **alongamento**, inicia entre 30 e 45 dias após o plantio e possui duração aproximada de 20 a 25 dias. Essa fase compreende os estádios de 6 a 10.

A terceira fase, o **espigamento**, é anunciada pelo emborrachamento e, poucos dias após, aparecem as espigas e a planta entra no período de florescimento. Essa fase tem duração média de 10 a 20 dias e ocorre por volta dos 50 a 60 dias após o plantio no trigo de sequeiro e 60 a 70 dias no trigo irrigado. Ela compreende os estádios 10.1 a 10.5.4.

A quarta e última fase, a **maturação**, corresponde à fase do desenvolvimento dos grãos, ocorre entre 60 a 90 dias após o plantio e tem duração, em média, de 30 a 40 dias. Essa fase inicia com o estágio de grãos leitosos até a maturação dos grãos, quando as folhas e espigas secam e os grãos podem ser colhidos, compreendendo os estádios 11.1 a 11.4 da Tabela 2.5.

TABELA 2.5 - Estádios de desenvolvimento de cereais - escala de Feekes

Estádio	Descrição
Perfilhamento	
1	Primeiro broto (uma ou mais folhas).
2	Início do perfilhamento.
3	Perfílios formados e folhas freqüentemente enroladas em espiral.
4	Início do aparecimento do pseudocaule, bainhas foliares começam a alongar-se.
5	Pseudocaule (formado por bainhas foliares) fortemente desenvolvido.
Alongamento	
6	Primeiro nó do colmo visível na base da gema.
7	Segundo nó do colmo já formado, folha bandeira quase visível.
8	Folha bandeira visível, mas ainda enrolada, espigas começando a desenvolver.
9	Lígula da folha bandeira bem visível.
10	Bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não são visíveis. Emborrachamento.
Espigamento	
10.1	Primeiras espigas bem visíveis. Emergência da espiga.
10.2	Um quarto do processo de espigamento completo.
10.3	Metade do processo de espigamento completo.
10.4	Três quartos do processo de espigamento completo.
10.5	Todas as espigas fora da bainha.
10.5.1	Começo do florescimento.
10.5.2	Florescimento completo na parte apical da espiga.
10.5.3	Florescimento completo na parte dorsal da espiga.
10.5.4	Final de florescimento, grãos no estágio aquoso.
Florescimento (Trigo)	
Maturação	
11.1	Grãos leitosos.
11.2	Grãos no estágio de massa macia, mas seca.
11.3	Grão duros.
11.4	Maturação de colheita. Palhas secas.

Fonte: LARGE (1954).

Considerando a duração total dos estádios, o ciclo de desenvolvimento do trigo, do plantio à maturação dos grãos, resulta entre 90 a 130 dias, estando de acordo com CAMARGO & FELÍCIO (1990).

A seguir são apresentados alguns estudos de desenvolvimento do trigo, avaliados segundo parâmetros de crescimento, por exemplo: massa de planta, massa de folhas, densidade de plantas e altura. As plantas nesses estudos foram cultivadas em condições de campo, sujeitas às variações climáticas. Segundo WALDREN & FLOWERDAY (1979), as variações climáticas não influem na ocorrência dos estádios de desenvolvimento da planta, e sim afetam as datas de ocorrência e duração dos estádios de crescimento. Desta forma, um enfoque foi dado para relacionar o comportamento do desenvolvimento do trigo ao estágio de crescimento da cultura.

PAGE et al. (1977) observaram no trigo de inverno, cultivado em condições de campo, que o máximo de matéria seca da planta por área ocorreu aos 15 dias antes da maturação, na emergência da espiga. Dessa fase em diante houve um decréscimo no acúmulo da matéria seca da planta, pois a diminuição de peso das folhas devida à senescência foi maior que o aumento em peso da espiga. Em contraste, para o trigo de primavera, segundo Gausser & Thorburn (1972) e Talibudeen et al. (1976), apud PAGE et al. (1977), os autores observaram que o máximo de matéria seca da planta ocorreu na maturação. Isso foi devido ao menor decréscimo do peso das folhas, comparado ao do trigo de inverno.

WALDREN & FLOWERDAY (1979) estudaram os estádios de desenvolvimento e a distribuição da matéria seca do trigo de inverno, cultivado em condições de campo nos EUA. Os autores observaram um aumento continuado na massa seca da planta ao longo do desenvolvimento da cultura, com o máximo de matéria seca por planta ocorrendo na maturação. O maior acúmulo de matéria seca da planta ocorreu no período entre o alongamento do colmo e o estágio de grãos de massa macia, mas seca. O máximo de matéria seca das folhas por planta ocorreu no florescimento (antése), declinando a seguir, e de forma mais acentuada durante o desenvolvimento dos grãos, com a translocação da matéria seca das folhas e dos

colmos e cabeça aos grãos. À medida que a planta começou a amadurecer e a perder a cor verde, a translocação da matéria seca diminuiu.

KARLEN & WHITNEY (1980) conduziram experimento com trigo de inverno cultivado em condições de campo nos EUA. O máximo de matéria seca total por área foi observado na fase de maturação fisiológica da escala de desenvolvimento de Feekes. O acúmulo de matéria seca da parte aérea da planta obedeceu ao modelo sigmóide, entre o ponto de quebra de dormência até a maturação de colheita. Nesse período, o maior crescimento ocorreu entre o alongamento do colmo e o florescimento (estádio de Feekes 10.5); a seguir começou a se estabilizar, atingindo o máximo na maturação - 11.2 (Tabela 2.5) e, depois, decresceu ligeiramente devido à senescência das folhas, até o ponto de colheita. Foi observado um aumento no acúmulo da matéria seca das folhas verdes entre os estádios de crescimento 4 e 8, declinando da mesma forma, em seguida, à medida que a planta se desenvolvia. Os aumentos na matéria seca das espigas excederam as perdas de matéria seca das folhas e hastes durante a maturação.

AASE (1978) observou que as medidas de área foliar eram freqüentemente necessárias como um índice de crescimento e para determinações de assimilação e de transpiração em estudos agronômicos e de fisiologia da planta, incluindo modelagem de crescimento de planta e modelagem de evapotranspiração. Como forma alternativa de obtenção indireta da medida de área foliar, o autor, em experimento com quatro cultivares de trigo de inverno cultivados em condições de campo nos EUA, estudou a relação entre a área foliar e a matéria seca. A matéria seca da planta por área foi crescente durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. Esse comportamento foi similar ao índice de área foliar até o estágio 5 da escala de Feekes. Já a matéria seca da folha e o índice de área foliar tiveram comportamento muito similares entre si durante todo o ciclo da cultura, com crescimento até atingir-se o pico próximo ao estágio 8, antes da matéria seca da planta atingir o máximo, e posterior declínio até a maturação de colheita. A área foliar e a matéria seca das folhas foram altamente correlacionadas por todo o ciclo da cultura ($R^2 = 0,951$), enquanto a área foliar e a matéria seca total da planta também foram altamente correlacionadas ($R^2 = 0,948$),

porém somente até o estágio 5, concluindo, portanto, que ao menos para o trigo de inverno, o índice de área foliar pode ser obtido por meio da determinação de matéria seca das folhas.

FONTOURA et al. (1988), em experimento com o cultivar de trigo IAC-24 – Tucuruí, em Dourados, MS, observaram que o máximo das produções de matéria seca por planta e por área ocorreram no estágio de grão leitoso (3,31g/planta e 3.577,5kg/ha) no regime de sequeiro e na maturação final (5,88g/planta e 10.178,8kg/ha) no irrigado. O número de plantas por área apresentou valor máximo no início do ciclo, diminuindo posteriormente até o mínimo na maturação final, nos tratamentos com e sem irrigação. A produtividade de grãos obtida foi de 1.858kg/ha para o regime de sequeiro e de 2.798kg/ha no irrigado.

2.3. CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO

Sobre a superfície do planeta encontram-se diferentes tipos de cobertura, que apresentam diferentes comportamentos ou características espectrais. Um exemplo é apresentado na Fig. 2.1, de uma superfície vegetada e de um solo exposto.

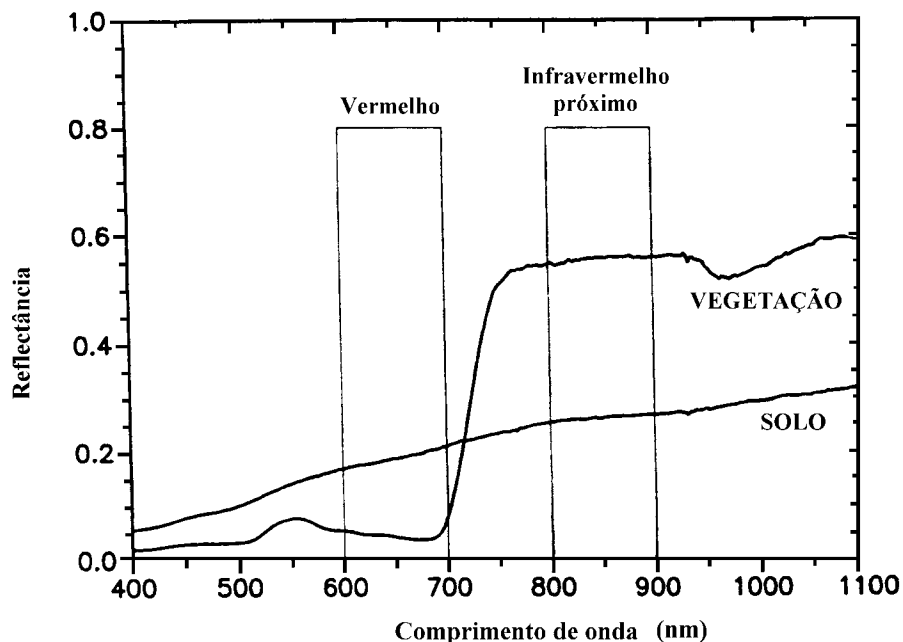


FIG. 2.1 – Reflectância espectral de dossel de vegetação e solo exposto. Barras verticais mostram as faixas definidas de comprimento de onda no vermelho e infravermelho próximo. (Fonte: Adaptado de MAAS, 1998).

Uma premissa básica nos estudos de sensoriamento remoto é de que as diversas coberturas de interesse podem ser separadas, fundamentadas em suas características espectrais, permitindo, desta forma, a utilização de dados obtidos de sistemas de varredura multiespectral com a finalidade de identificar e mapear as coberturas da superfície da Terra. Segundo HOFFER (1978), muito embora a experiência tenha comprovado que essa premissa é freqüentemente válida, também ocorre que algumas coberturas de interesse ainda não puderam ser separadas e

identificadas espectralmente, indicando que a efetiva utilização de dados multiespectrais de um sensor remoto requer o conhecimento minucioso das características espectrais das coberturas da superfície terrestre e dos fatores que as influenciam.

O sinal que chega ao sensor multiespectral localizado remotamente é o resultado das múltiplas interações da radiação solar incidente entre os elementos da vegetação e o solo adjacente, que caracterizam espectralmente a superfície vegetada. As diferentes respostas espectrais são ocasionadas por fatores que se referem às características próprias do cultivo, tais como: estrutura vegetal, conteúdo de água, deficiências minerais, doenças e pragas e estágio fenológico. As respostas espectrais estão também relacionadas às formas como ocorrem as interações entre as radiações eletromagnéticas e o alvo estudado, como por exemplo a geometria de iluminação e de observação e as condições atmosféricas do local, no momento da aquisição do sinal.

Dentre os elementos da planta, as folhas desempenham grande importância como principal estrutura fotossintetizante. Na Fig. 2.2, é apresentada a curva de reflectância espectral de uma folha de trigo, podendo ser generalizada como típica de uma folha de qualquer vegetação sadia. Nela pode-se observar que a reflectância varia em função do comprimento de onda, com regiões do espectro mais significativas e distintas nos comprimentos de onda do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio. Pode-se observar que a folha da planta também absorve e transmite a radiação incidente, dependendo do comprimento de onda da radiação. A soma desses três componentes de energia (refletida, absorvida e transmitida) é a energia incidente e essa relação é descrita como a equação de balanço de energia.

Segundo HOFFER (1978), MYERS (1983) e GUYOT (1988), de uma forma geral, nos comprimentos de onda visíveis, a maior parte da energia incidente é absorvida, com a folha apresentando baixa reflectância e baixa transmitância (vide Fig. 2.2). Esse comportamento é principalmente devido à pigmentação das folhas, em especial a clorofila. Na região do infravermelho próximo, a reflectância cresce notavelmente, sendo que cerca da metade da energia incidente é refletida, quase a metade é transmitida e muito pouco absorvida pela folha. Esse comportamento é

determinado principalmente pela estrutura interna das folhas. Na região do infravermelho médio, há uma queda da reflectância da folha, afetada essencialmente pelo conteúdo de água das folhas que absorve muito da energia incidente.

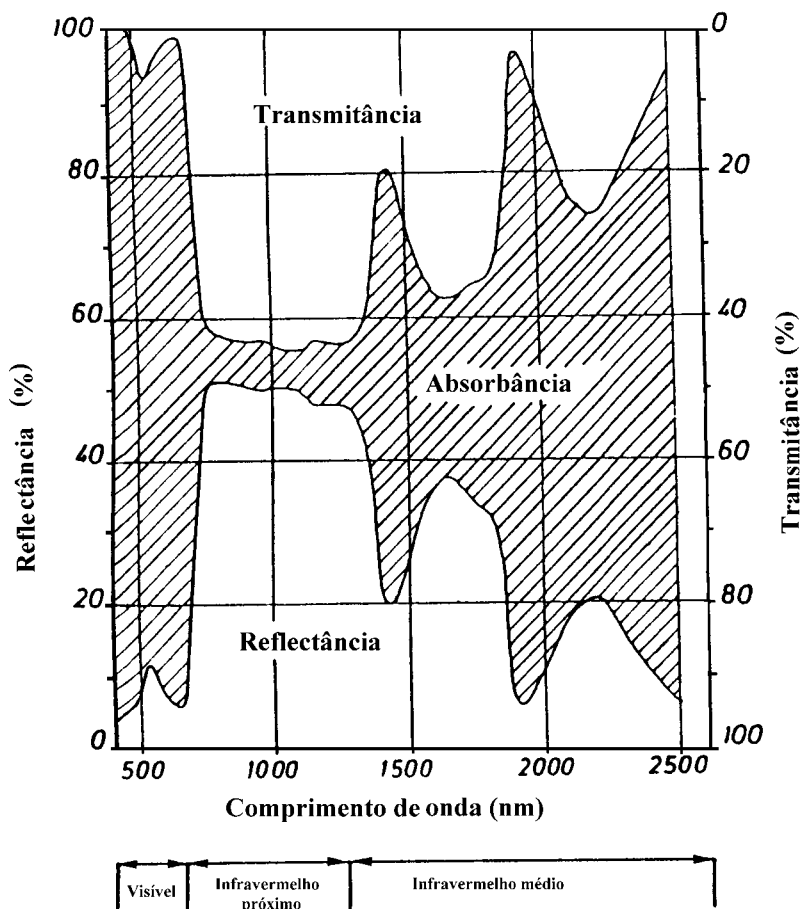


FIG. 2.2 – Evolução das propriedades ópticas de uma folha de trigo em função do comprimento de onda. (Fonte: Adaptado de GUYOT, 1988).

Considerando um estande de vegetação densa, segundo MONTEITH & UNSWORTH (1990), a reflectância e a transmitância dependem de dois fatores principais: da fração da radiação solar interceptada pela folhagem e das propriedades de espalhamento da folhagem. Neste contexto, os autores adotam “folhagem” como todos os elementos da planta acima da superfície do solo, tais como, folha, haste e pecíolo. Ainda, segundo esses autores, a fração interceptada, por sua vez, depende da

área específica da folhagem, definida como Índice de Área Foliar – IAF (área plana de folhas por unidade de área do terreno) e da distribuição espacial da folhagem em relação à direção da radiação; e a fração espalhada depende das propriedades ópticas das folhas (cutículas, paredes da célula e pigmentos). Quando a folhagem não é densa o suficiente para interceptar toda a radiação incidente, a resposta espectral vai depender tanto do solo como da folhagem.

LEAMER et al. (1980) estudaram as mudanças sazonais na reflectância de três cultivares de trigo de primavera e as relacionaram com o seu desenvolvimento fenológico, utilizando os estádios de crescimento de Feekes. Os autores observaram que após as plantas atingirem cerca de 25% de cobertura do terreno, as curvas de reflectância tiveram forma característica de superfícies vegetadas, isto é, reflectância relativamente baixa nos comprimentos de onda visíveis (0,40 a 0,70 μ m) e aumento brusco no platô do infravermelho próximo (0,75 a 1,35 μ m). Nos comprimentos de onda do infravermelho próximo as reflectâncias foram indicativas do estágio fisiológico do crescimento da planta e da quantidade de material verde da planta. À medida que as plantas entraram no estágio de emborrachamento, as folhas das camadas inferiores da planta começaram a perder a clorofila e a coloração verde e as espigas, que continham menos clorofila que as folhas, começaram a ser expostas. O decréscimo nos níveis de clorofila nessas folhas ocasionou o decréscimo na reflectância do infravermelho próximo, indicando o desenvolvimento fisiológico nos estádios de emborrachamento, florescimento e maturação.

HINZMAN et al. (1986) determinaram os efeitos da adubação nitrogenada na reflectância espectral e nas características agrônômicas do trigo de inverno, cultivado em campo. A adubação de N reduziu a reflectância do visível, aumentou a do infravermelho próximo e decresceu a do infravermelho médio. Essas mudanças foram relacionadas com os níveis mais baixos de clorofila e reduzida área foliar do trigo com estresse de N, em comparação com as plantas com adequado ou alta fertilidade de N, indicando, desta forma, que medidas multiespectrais podem ser utilizadas para distinguir o trigo com deficiência de N do trigo sadio. Os autores também observaram que o índice de área foliar (IAF) verde foi um importante descritor dos dosséis de

trigo, podendo ser estimado de forma segura com dados espectrais. O IAF verde máximo foi alcançado antes do espigamento e, depois, declinou à medida que as folhas das camadas inferiores da planta senesceram. A reflectância máxima do infravermelho próximo ocorreu simultaneamente com o IAF máximo e, à medida que a quantidade de área foliar verde decrescia, a reflectância nas bandas de absorção de clorofila aumentou.

BARET et al. (1987) monitoraram a evolução dos fatores de reflectância de quatro cultivares de trigo durante o ciclo de crescimento da cultura. O comportamento geral da evolução sazonal do espectro de reflectância foi independente do cultivar e das datas de plantio, porém foi fortemente dependente do estágio fenológico da cultura. Antes do espigamento, a evolução da reflectância foi influenciada pela fração de área do solo exposto. Após o espigamento e no início da senescência, cresce o número de folhas que amarelecem, desta forma, afetando o espectro de reflectância do dossel. Durante a senescência, a reflectância do dossel aumentou no visível e decresceu no infravermelho próximo.

Os dados espectrais coletados no campo, como por exemplo os obtidos nos trabalhos citados acima, são obtidos por “radiometria de campo”, pois as medidas obtidas por essa técnica são básicas nos estudos quantitativos da vegetação por sensoriamento remoto (BARRETT & CURTIS, 1992).

Segundo MILTON (1987), a “radiometria de campo” ou “espectroscopia de campo” é uma técnica de fundamental importância no sensoriamento remoto e envolve o estudo das inter-relações entre as características espectrais dos objetos e seus atributos biológicos no ambiente de campo.

Os dados obtidos da radiometria de campo têm uma importante aplicação em pelo menos três áreas do sensoriamento remoto (MILTON, 1987). Primeiramente, na calibração dos dados, servindo como ponte entre as medidas de reflectância espectral de laboratório e as obtidas em condição de campo, mais especificamente, sendo útil na calibração de sensores à bordo de aviões e de satélites. Em segundo lugar, na estimativa das condições ótimas referentes às bandas espectrais, configuração de

observação e época para realizar uma determinada pesquisa em sensoriamento remoto. Em terceiro lugar, como ferramenta básica no desenvolvimento, aperfeiçoamento e comprovação dos modelos que relacionam atributos biofísicos e dados espectrais.

Na maioria das medidas de campo é estimado o “fator de reflectância”, que é definido como sendo a razão entre o fluxo radiante refletido pela superfície de amostra ou alvo e o fluxo refletido no mesmo ângulo sólido por uma superfície padrão perfeitamente difusa (lambertiana) irradiada da mesma forma como na amostra (NICODEMUS et al., 1977). Não existindo uma superfície padrão perfeitamente difusa, adota-se uma superfície de referência, denominada geralmente de painel de referência, e multiplica-se a relação anterior com o termo que representa o fator de reflectância desse painel, corrigindo as propriedades de reflectância não ideais da superfície de referência (BOWKER et al., 1985), como segue:

$$R_{alvo} = \frac{(V_{alvo})}{(V_{painel})} \times FC_{painel}$$

onde R é o fator de reflectância, V é a resposta do instrumento de medida e FC é o fator de calibração.

O fator de calibração do painel de referência é obtido habitualmente em laboratório, sendo esse fator específico para as propriedades refletivas do painel construído. As superfícies de referência utilizadas no campo são geralmente de painel de alumínio recobertas com material altamente refletor, tais como sulfato de bário ($BaSO_4$) ou politetrafluoretileno (halon, TFE ou PTFE), segundo JACKSON et al. (1987). Esses autores citam a importância da calibração do painel, pois suas propriedades refletivas podem variar na sua construção (uma mesma pessoa, simultaneamente, pode construir painéis, cujos fatores de reflectância podem diferir) e com o seu uso, ao longo do curso do experimento de campo. Mais recentemente, alvos de referência podem ser encontrados no mercado (Spectralon), feitos de material altamente refletor, quimicamente inertes, possíveis de serem lavados e muito apropriados para utilização no campo.

Os métodos de medida do fator de reflectância podem ser divididos em dois: com obtenção das medidas de radiância do alvo e do painel de referência de forma simultânea, utilizando dois radiômetros e seqüencial, com um radiômetro. DUGGIN (1980) cita que, utilizando o método de medidas simultâneas, os principais erros ocasionados por mudanças na irradiância (variações atmosféricas) podem ser evitados. No entanto, medidas seqüenciais são ainda muito adotadas, possivelmente por limitação de equipamento.

DUGGIN & CUNIA (1983) observaram que, sob condições de céu limpo, o fator de reflectância calculado das medidas seqüenciais teve variância ligeiramente maior que o calculado pelas medidas simultâneas. Porém, em condições de céu com nuvens, não imediatamente adjacentes ao sol, as medidas simultâneas introduziram menos variação no fator de reflectância.

MILTON (1987) considera que nenhum dos métodos é adequado para as condições de céu com nuvens passando em frente ao sol, mas que para as condições de céu limpo o método simultâneo reduzirá os erros devidos às mudanças na radiação ocorridas em pequeno período de tempo, possivelmente, à custa de maiores problemas com a calibração do equipamento e, principalmente, o autor cita que o ponto mais importante é conhecer as limitações das técnicas disponíveis e assegurar-se que os dados venham incluídos, de forma detalhada, da configuração de medida utilizada.

2.4. INDICADORES ESPECTRAIS DO ESTADO DA VEGETAÇÃO

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, como os resultantes do solo, da geometria de medida e das influências atmosféricas.

Segundo RONDEAUX (1995), em sua maioria, os índices de vegetação possuem boa correlação com as características biofísicas dos dosséis (por exemplo, biomassa, índice de área foliar, estágio fenológico e vigor), porém, como são afetados em diferentes níveis pelos fatores externos, isso tem ocasionado o desenvolvimento de inúmeros índices, na tentativa de ampliar seu campo de aplicação.

Segundo BARET & GUYOT (1991), os índices de vegetação mais comumente utilizados empregam as informações contidas nas reflectâncias ou radiâncias das coberturas vegetais no vermelho (R) e no infravermelho próximo (NIR), faixas de comprimento de onda em que a vegetação verde apresenta comportamento bem distinto.

Como seu uso tem se estendido aos diversos sensores de satélite (por exemplo, NOAA/AVHRR, Landsat e SPOT), R e NIR podem-se referir, respectivamente, às bandas visível e infravermelho próximo dos sensores de satélite, onde R pode cobrir não somente os comprimentos de onda vermelho, mas uma área maior do espectro visível, incluindo o verde, como ocorre no canal 1 do AVHRR. A seguir são apresentados três dos índices mais conhecidos e empregados:

Índice de Vegetação por Razão ou *Ratio* (RATIO): Varia de zero a infinito. Valores muito altos indicam grande teor de biomassa.

$$\text{RATIO} = \frac{\text{NIR}}{\text{RED}}$$

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI): Apresenta a vantagem de variar entre -1 e +1. Valores próximos de zero significam áreas sem vegetação verde e valores próximos de +1 (0,8-0,9), indicam maior densidade possível de folhas verdes.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Índice de Vegetação Transformado ou *Transformed Vegetation Index* (TVI): A constante 0,5 é introduzida a fim de evitar os valores negativos. Porém, não funciona para valores de NDVI inferiores a -0,5.

$$TVI = \sqrt{\left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right)} + 0,5$$

Uma revisão mais extensa sobre os índices de vegetação espectrais e seu histórico de desenvolvimento podem ser encontrados em TUCKER (1979), PERRY & LAUTENSCHLAGER (1984), BARET & GUYOT (1991) e RONDEAUX (1995).

A seguir são apresentados alguns estudos relacionando os indicadores espectrais e as variáveis biofísicas do trigo.

TUCKER et al. (1980) conduziram experimento com trigo de inverno, relacionando os dados obtidos por radiometria de campo e a produtividade final de grãos. Foram observadas relações lineares significativas entre os índices de vegetação (RATIO e NDVI) e a produtividade de grãos, sendo que os dados espectrais foram mais altamente correlacionados no período de tempo de cinco semanas, entre os estádios de desenvolvimento da planta do alongamento ao florescimento, e foram menos relacionados no início e no final do ciclo de crescimento do trigo. Os índices de vegetação foram calculados utilizando as medidas de radiância espectral nas faixas do sensor MSS do satélite Landsat: vermelho (0,65-0,70 μ m) e infravermelho próximo (0,775-0,825 μ m).

AHLRICHS & BAUER (1983) obtiveram, para o trigo de primavera, altas correlações entre a resposta espectral e a percentagem de cobertura do solo, o índice

de área foliar (IAF), a biomassa e o conteúdo de água da planta. Foram utilizados como dados espectrais os fatores de reflectância correspondentes às faixas de comprimento de onda do satélite Landsat/MSS e TM e os índices de vegetação RATIO, NDVI e “greenness”, este último obtido de equação de combinação linear utilizando os fatores de reflectância das quatro bandas do Landsat/MSS. Os autores observaram que a relação entre as variáveis biofísicas e a reflectância foi influenciada pelo estágio de desenvolvimento da cultura e as melhores correlações foram obtidas entre o perfilhamento e o florescimento. Antes do perfilhamento, a resposta espectral foi fortemente influenciada pelo solo e, após o florescimento, à medida que a cultura começou a amadurecer, a sensibilidade espectral às medidas biofísicas diminuiu. Os índices de vegetação utilizados foram altamente correlacionados entre si e não permitiram a definição do melhor índice (AHLRICHS & BAUER, 1983).

ASRAR et al. (1984), em estudo com trigo de inverno e de primavera, a partir de dados de radiometria de campo, observaram que NDVI foi dependente de IAF. Para IAF inferior a 3, o NDVI foi influenciado principalmente pela reflectância do solo e para IAF entre 3 e 6, NDVI foi mais dependente da reflectância do infravermelho próximo. Para IAF superior a 6, a dependência de NDVI no infravermelho próximo foi limitado. Os autores utilizaram os dados espectrais simulando as bandas do Landsat/MSS.

FORMAGGIO (1989) observou relações significativas entre os dados orbitais do Landsat/TM, de radiometria de campo e as variáveis biofísicas para o trigo cultivado em áreas comerciais da região nordeste do Estado de São Paulo. As bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, bem como os índices de vegetação RATIO, NDVI e TVI foram excelentes indicadores das condições gerais da cultura. Nas fases finais do ciclo de desenvolvimento da cultura, as correlações entre as variáveis espectrais e as variáveis biofísicas decaíram significativamente. As maiores correlações devem estar compreendidas em partes intermediárias do ciclo de desenvolvimento da cultura, com amplo predomínio das relações curvilineares (modelos logarítmicos e exponenciais).

RUDORFF & BATISTA (1990) analisaram o comportamento espectral de três variedades de trigo (Anahuac, IAC-24 e BH-1146), utilizando a radiometria de campo em áreas exploradas comercialmente da região sudoeste do Estado de São Paulo. Foi observada boa correlação entre o índice de vegetação e a produtividade final de grãos nos estádios de desenvolvimento entre o emborrachamento e o início do florescimento, sendo que a maior correlação foi obtida no final do emborrachamento. A correlação entre os dados espectrais e a produtividade decresceu à medida que a cultura atingia a maturação e a senescência. Devido aos problemas apresentados pelo radiômetro utilizado, a análise quantitativa foi restrita aos comprimentos de onda inferiores a 900nm e, portanto, sem correspondência com as bandas espectrais dos sensores TM, MSS ou AVHRR.

BOISSARD et al. (1993) estudaram as mudanças nas reflectâncias e no NDVI do trigo, a partir de medidas obtidas por radiometria de campo, utilizando as bandas de comprimento de onda similares às do sensor HRV do satélite SPOT. Os autores destacaram a importância do período compreendido entre os estádios de florescimento (antése) e a maturidade, como uma fase decisiva na produtividade final do trigo por corresponder à formação e ao enchimento dos grãos. Também observaram que o NDVI mostrou ser o melhor estimador do estágio de desenvolvimento da cultura, comparado às bandas brutas estudadas.

FERNÁNDEZ et al. (1994) estudaram o efeito do estresse de adubação nitrogenada e de água nas características espectrais do trigo de inverno, obtidas por radiometria de campo e foram relacionadas com parâmetros biofísicos da cultura. As mudanças sazonais nas reflectâncias espectrais do trigo foram dependentes do estágio fenológico da cultura. O estresse de água moderado diminuiu a reflectância do dossel na banda do infravermelho próximo e o aumento na adubação causou um decréscimo da reflectância na banda do visível. O índice NDVI, calculado utilizando as reflectâncias de 842 e 660nm, foi eficaz para estimar a área total de folhas da planta e o IAF. O NDVI aumentou até um valor máximo, cerca de um mês antes do espigamento e após o espigamento o NDVI decresceu progressivamente. Os estresses

de nitrogênio e hídrico puderam ser diferenciados pela inclinação do NDVI, ao longo do estágio de maturação.

2.5. SISTEMA NOAA-AVHRR

Segundo KIDWELL (1998), os satélites da série TIROS-N foram projetados para operar em órbita quase polar e heliossíncrona. Essa série é composta do satélite TIROS-N (lançado em outubro de 1978) e dos satélites NOAA-6 (lançado em junho de 1979) ao NOAA-14 (lançado em dezembro de 1994). O período orbital é de cerca de 102 minutos, produzindo 14,1 órbitas por dia. Os principais instrumentos desse sistema de satélites são os sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e o TOVS (*TIROS Operational Vertical Sounder*). O TOVS fornece dados de sondagem de vapor d'água, temperatura e conteúdo de ozônio em três níveis da atmosfera. O AVHRR é um radiômetro multiespectral que obtém imagens de 10 bits em cinco canais do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho termal, com resolução de aproximadamente 1,1km no nadir. Na Tabela 2.6 estão apresentadas algumas das características dos canais do sensor AVHRR.

O sistema NOAA-AVHRR foi desenvolvido para fins meteorológicos. Segundo GUYOT (1989), o fato das bandas do visível e do infravermelho próximo do captor AVHRR serem mais estreitas que as de outro satélite meteorológico, o Meteosat, permite ao AVHRR obter uma informação espectral que pode ser utilizada para caracterizar a superfície terrestre, tornando possível distinguir o solo da vegetação, caracterizar o desenvolvimento da vegetação e estimar, de modo global, a produção da biomassa.

Na aplicação dos satélites NOAA na agricultura, as bandas do visível e do infravermelho próximo (canais 1 e 2) do sensor AVHRR permitem acompanhar o desenvolvimento da cobertura vegetal. Também, é possível, utilizando as bandas do infravermelho termal (3, 4 e 5), estimar a temperatura de superfície, um parâmetro

básico no balanço de energia, possibilitando, em consequência, a estimativa da evapotranspiração da cultura.

TABELA 2.6 – Canais espectrais do sensor AVHRR (NOAA-9 e NOAA-14)

Canal	Limites espectrais (nm)	Região	IFOV (mr)
1	580-680	Visível	1,39
2	725-1.100	Infravermelho próximo	1,41
3	3.550-3.930	Infravermelho termal	1,51
4	10.300-11.300	Infravermelho termal	1,41
5	11.500-12.500	Infravermelho termal	1,30

Fonte: Adaptado de KIDWELL (1998)

O grande interesse dos satélites meteorológicos é certamente a alta frequência de cobertura e de aquisição das imagens, o que possibilita uma maior probabilidade de obtenção de imagens nos períodos críticos do desenvolvimento da cultura. Em termos de previsão da produção, são boas as oportunidades e viabilidades de utilização desses dados em estudos de áreas relativamente grandes e homogêneas.

Os satélites de observação da terra (por exemplo, o Landsat e o SPOT) apresentam como principal limitação a frequência de imageamento relativamente baixa, reduzindo grandemente seu uso no monitoramento, especialmente em áreas de alta cobertura de nuvens (TOWNSHEND & TUCKER, 1984). Essa característica dificulta sua utilização no acompanhamento da evolução das coberturas vegetais. Em contrapartida, esses satélites apresentam uma alta resolução espacial (10 a 30m) e fornecem informações multiespectrais detalhadas no visível, no infravermelho próximo e médio.

TOWNSHEND & TUCKER (1984) verificaram a viabilidade da utilização dos dados AVHRR dos satélites NOAA-6 e NOAA-7 no mapeamento da cobertura do terreno. Para tanto, foram comparadas as bandas e o NDVI respectivos das imagens

AVHRR e Landsat/MSS de três locais testes localizados nos EUA, Egito e Itália. Os dados AVHRR e MSS foram fortemente correlacionados, indicando a possibilidade do uso de dados AVHRR no mapeamento da cobertura do terreno, especialmente em pequenas escalas e para grandes áreas.

GERVIN et al. (1985) também estudaram a possibilidade de utilizar dados AVHRR no mapeamento da cobertura do terreno. Foram comparadas as classificações das coberturas do terreno obtidas de imagens AVHRR (NOAA-7) e MSS de uma área teste nos EUA. O AVHRR realizou tão bem ou melhor do que o MSS a classificação de grandes áreas homogêneas, indicando o AVHRR como promissor para o mapeamento regional de cobertura do terreno. Além de sua precisão no mapeamento, os autores citam como vantagens o menor custo no processamento e a maior frequência de cobertura do AVHRR.

WYLIE et al. (1991) obtiveram correlação significativa entre dados de NDVI obtidos do NOAA-AVHRR e dados de biomassa de culturas herbáceas em áreas da região do Saara, na Nigéria, nos anos de 1986 a 1988. O modelo de regressão linear foi posteriormente invertido para estimar a biomassa através dos dados do satélite. PRINCE (1991) observou forte relação linear entre os valores de NDVI obtidos do NOAA-AVHRR e a produção primária (pastagem) sazonal em três países da região semi-árida do Saara, nos anos de 1981-1988.

QUARMBY et al. (1992) utilizaram dados NOAA-AVHRR na estimativa das áreas das culturas de trigo, arroz, algodão e milho no norte da Grécia. As áreas estimadas das culturas foram comparadas aos dados estatísticos oficiais, sendo observada uma precisão média de 89% das áreas estimadas em escala regional. Nesse estudo, por hipótese, cada pixel do AVHRR era uma mistura das quatro culturas. As áreas de trigo foram estimadas de forma precisa quando a área era ou dominada ou quase ausente de trigo.

QUARMBY et al. (1993) estudaram a possibilidade de utilização dos dados AVHRR na estimativa e previsão da produtividade das culturas de trigo, arroz, algodão e milho no norte da Grécia. As produtividades das culturas foram estimadas

com alto grau de precisão utilizando uma relação linear simples entre o NDVI e a produtividade. Foi observada considerável similaridade entre as produtividades estimadas e oficiais. Porém, para o trigo foi recomendada a associação com um modelo agrometeorológico para modificar o modelo de produtividade no período de enchimento de grãos. Os autores explicaram que a produção do trigo é principalmente controlada pelo comprimento do período de enchimento de grãos e que o modelo de produtividade baseado somente no NDVI não foi sensível a essas condições. O NDVI foi excelente para fornecer informações nos estágios de germinação e desenvolvimento vegetativo do trigo e o uso de um modelo agrometeorológico seria necessário no período de enchimento dos grãos (QUARMBY et al., 1993).

O principal problema em utilizar dados AVHRR na estimativa de área de cultura e no monitoramento da cultura é a grande área de terreno de cada pixel comparada ao tamanho médio das áreas de culturas agrícolas (QUARMBY et al., 1992 e 1993). Para se superar este problema, são utilizadas áreas de terreno homogêneas e relativamente grandes de culturas, observadas nas imagens. Além disso, existe a dificuldade de relacionar dados de campo de pequenas áreas com os pixels do AVHRR (QUARMBY et al., 1992 e 1993). Dessa forma, esses autores optaram por utilizar os dados de um sensor de satélite com uma alta resolução espacial (SPOT HRV) como uma etapa intermediária para relacionar as medidas de pequenas áreas de terreno com as grandes áreas do AVHRR.

GUPTA (1993) comparou os índices de vegetação RATIO e NDVI ao longo do ciclo de crescimento do trigo, obtidos de dados AVHRR de dois distritos da Índia. A taxa de crescimento do RATIO foi maior comparada à do NDVI entre os estádios de emergência e de alongamento da haste e depois foi semelhante ao NDVI nos estádios de alongamento, espigamento, florescimento e maturação (grãos leitosos e duros). Nos estádios finais do ciclo de crescimento da cultura, o RATIO foi novamente mais sensível que o NDVI. O NDVI pareceu ser menos afetado pelos fatores atmosféricos nos estádios entre o alongamento e a maturação comparado ao RATIO. O RATIO foi menos sensível ao efeito do solo e menos afetado pela chuva. Os autores sugerem

utilizar o RATIO para estimar o NDVI nos estádios inicial e de senescência da maturação do ciclo de crescimento do trigo e o NDVI diretamente nos outros estádios.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO E CONDUÇÃO DA CULTURA

O experimento foi conduzido durante a estação de crescimento de 1995, nos meses de maio a agosto.

A área de estudo localizava-se no município de Paranapanema, à sudoeste do Estado de São Paulo (Fig. 3.1), em uma propriedade agrícola comercial, denominada “Fazenda Alto do Rincão”, associada à Cooperativa Agro-Industrial Holambra. A área está situada nas coordenadas geográficas 23°30’24”S e 48°55’14”O e a 585m de altitude (Fig. 3.2).

Na seleção da área procurou-se atender às condições ideais de estudo em sensoriamento remoto de culturas: área de grande dimensão (aproximadamente 100ha), compatível com a resolução espacial de 1,1km do sensor AVHRR no nadir, terreno de relevo plano a suave ondulado, predominância de um tipo de solo e uniformidade de cultivar e de manejo da cultura em toda a área.

A área selecionada foi de tamanho aproximado de um pixel da imagem NOAA-AVHRR e bordadura de 500m de mesmo cultivo. Essa condição foi observada quando do início do experimento.

O solo da área foi classificado como Latossolo Roxo álico, A moderado, textura muito argilosa e relevo suave ondulado. A área possuía sistema de irrigação por aspersão, tipo pivô central de raio de 610m e área de abrangência de 117ha.

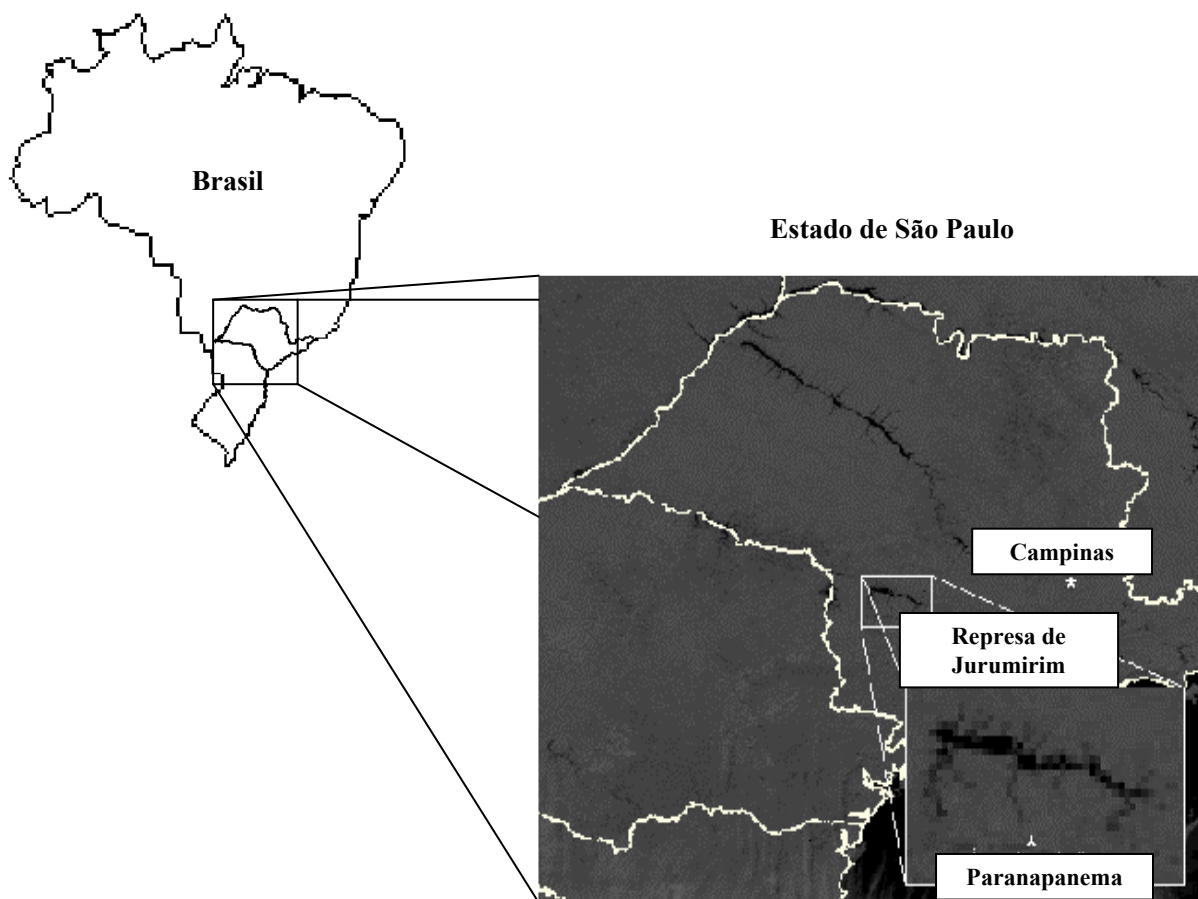


FIG. 3.1 - Localização do município de Paranapanema - SP, área de estudo, e do município de Campinas - SP, onde situa a estação de recepção de imagens do satélite NOAA. Imagem em destaque: imagem NOAA-14/AVHRR-LAC/HRPT, setorizada para o Estado de São Paulo, canal 2, de 14 de agosto de 1995, 17:09 GMT (*Greenwich Mean Time*).

O cultivar de trigo plantado foi o Tucuruí (IAC-24), adotado em 80% das terras destinadas ao plantio do trigo da região. O “Tucuruí”, segundo FELÍCIO et al. (1988), apresenta as seguintes características agronômicas: altura média de 80cm, ciclo precoce, 120 dias da maturação à colheita; aurícula violácea, não em toda a área; posição intermediária das folhas; coloração da panícula creme, aristada, oblonga e grãos avermelhados. O cultivar é tolerante ao Al^{+3} e apresenta qualidade superior de panificação. A produtividade média obtida em experimento de FELÍCIO et al. (1988),

com irrigação por aspersão, foi de 2.842kg/ha. BOARETTO et al. (1997) também em condições de experimento, porém analisando a resposta da cultura aos diferentes níveis de adubação nitrogenada, obtiveram média de 4.757kg/ha, bem acima da produtividade média do Estado de São Paulo, de 1.716kg/ha (Tabela 2.4).

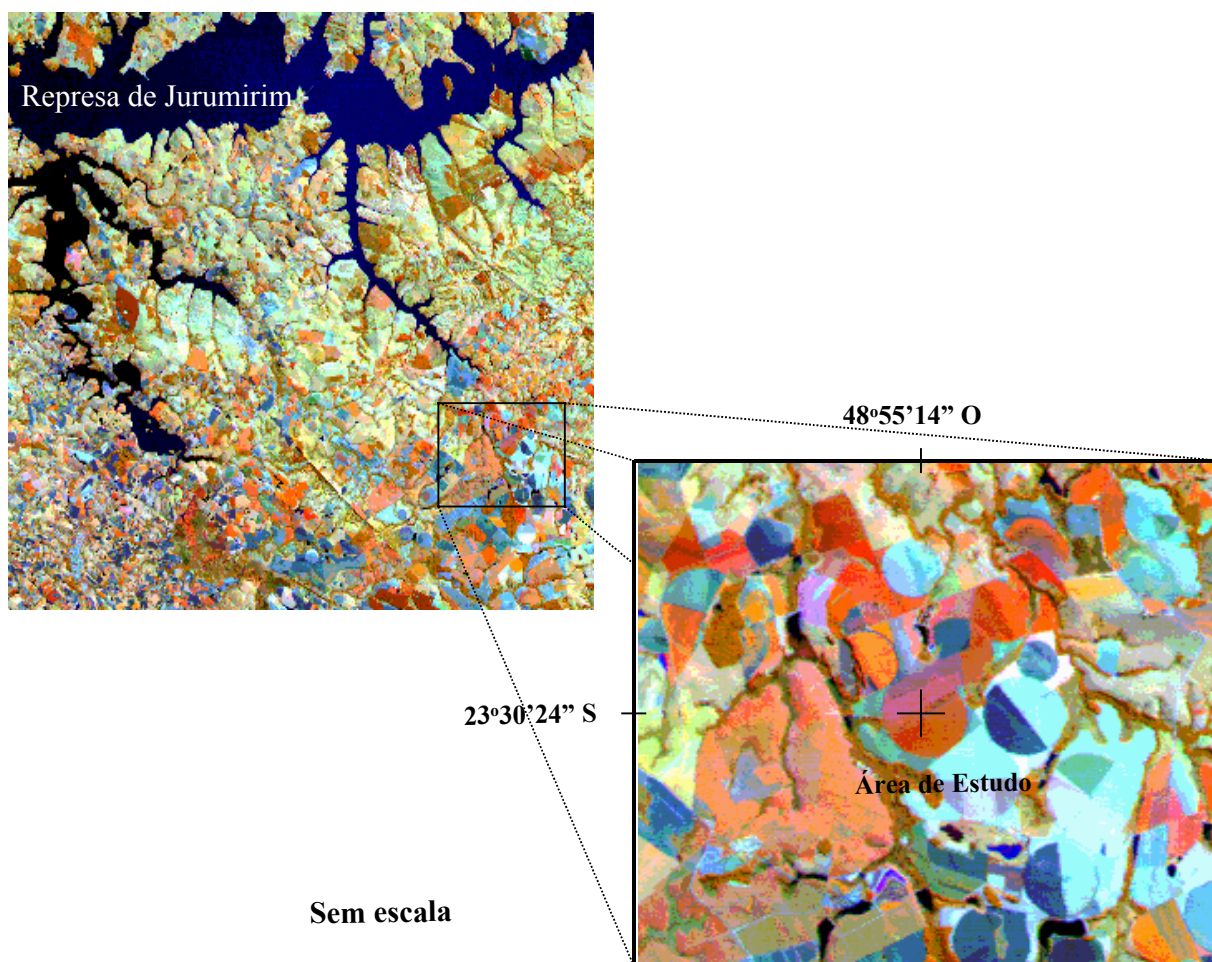


FIG. 3.2 – Localização da área de estudo. Imagem Landsat 5 TM, combinação falsa cor 4-5-3 (RGB), de 13 de agosto de 1995.

O sistema de cultivo de Plantio Direto fora adotado havia cinco anos na região. Nesse sistema a implementação da cultura se faz sem o preparo de solo e o plantio é realizado sobre a palha das culturas anteriores, que forma uma cobertura permanente do solo com a vegetação morta. As vantagens desse sistema são as de

reduzir as perdas de solo e de água do solo, de matéria orgânica e de nutrientes, principalmente nitrogênio e potássio.

As operações agrícolas, tais como plantio, tratos fitossanitários e colheita, eram todas mecanizadas. O plantio foi realizado com semeadora-adubadora sobre os restos da cultura precedente, o milho. Em decorrência da grande extensão da área, essas operações eram concluídas em intervalos de tempo que variavam de alguns dias até uma semana.

O plantio do trigo iniciou em 15 de abril de 1995, utilizando-se densidade de 70 sementes por metro linear e espaçamento entre linhas de 0,20m. A colheita foi iniciada em 29 de agosto, completando o ciclo de desenvolvimento de 135 dias.

A calagem foi realizada dez dias antes do plantio, com aplicação de 5.000kg/ha de calcário e, posteriormente, com incorporação a 0,25m de profundidade. A adubação no plantio foi com aplicação de 300kg/ha de fertilizantes NPK na fórmula 08-28-16 e 83kg/ha de uréia, em cobertura, aos 35 dias após a emergência e repetindo a dosagem decorridos 55 dias da emergência, anterior ao estágio de emborrachamento. Os tratos fitossanitários foram realizados com aplicações de inseticidas e fungicidas. As irrigações, de acordo com o esquema de irrigação adotado pelo produtor, totalizaram três aplicações durante o ciclo de desenvolvimento do trigo.

3.2. MEDIDAS FÍSICAS DO AMBIENTE

Os dados de temperatura e de umidade relativa do ar foram registrados pelo termógrafo e higrógrafo, ambos da marca Fisher (Veb Feingeratebau Drebach)⁶, de rotação semanal, com erro de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para a temperatura definida na faixa entre -10 e $+30^{\circ}\text{C}$, erro de $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ em fundo de escala e $\pm 3\%$ para a umidade relativa de 20 a 100%. Os aparelhos foram colocados em abrigo meteorológico localizado a aproximadamente 200m de distância do experimento.

Os dados de precipitação foram coletados pelo pluviômetro, tipo Ville de Paris, instalado próximo ao abrigo.

A umidade do solo foi obtida pelo método gravimétrico, de amostras de solo coletadas nas profundidades de 0-20cm e de 20-40cm, nas parcelas experimentais, nas datas de campanha.

3.3. DATAS DE CAMPANHA

As datas das campanhas para a coleta de dados de campo foram definidas em função da probabilidade de obtenção de imagens NOAA de boa qualidade sobre o local. A imagem para ser considerada de boa qualidade, além de apresentar-se sem contaminação de nuvens, deveria atender às características básicas referentes à órbita de passagem do satélite, adotadas neste estudo, tais como ângulo de elevação superior a 60° e direção do centro da passagem à oeste da estação de recepção de imagens, em Campinas, SP.

⁶ As marcas comerciais citadas não indicam recomendações do autor ou da UNICAMP.

Sete campanhas foram realizadas no período de desenvolvimento do trigo e estão apresentadas na Tabela 3.1. As campanhas iniciaram em 23 de maio de 1995, 38 dias após o plantio, e foram encerradas em 28 de agosto de 1995, um dia antes da colheita. Excepcionalmente, na última data de campanha, dia 28 de agosto (240 dias decorridos no ano - DDA), embora sem possibilidade prévia de obtenção de imagem de boa qualidade, segundo os critérios adotados, foram realizadas as medidas de radiometria de campo e biofísicas da cultura, a fim de caracterizar o ponto de colheita.

TABELA 3.1 – Datas das campanhas: dia do ano, dias decorridos no ano (DDA) e dias após o plantio (DAP), no período de maio a agosto de 1995

Data	DDA	DAP
23 maio	143	38
31 maio	151	46
22 junho	173	68
28 junho	179	74
26 julho	207	102
14 agosto	226	121
28 agosto	240	135

3.4. AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA

Na avaliação do desenvolvimento da cultura foram obtidos dados biofísicos e dados espectrais. Os dados espectrais compreendem a radiometria de campo e as imagens do satélite NOAA-AVHRR. O fluxograma da metodologia está apresentada na Fig. 3.3.

Por ser uma área explorada comercialmente, de grande extensão, e de forma a obter-se a representatividade do desenvolvimento da cultura, a área de estudo foi dividida em cinco sub-áreas, relativamente mais homogêneas, considerando a sequência de plantio. Nas datas de campanha, em cada uma dessas sub-áreas, foi definido um ponto amostral, ao redor do qual foram obtidos os dados de radiometria de campo e biofísicos da cultura.

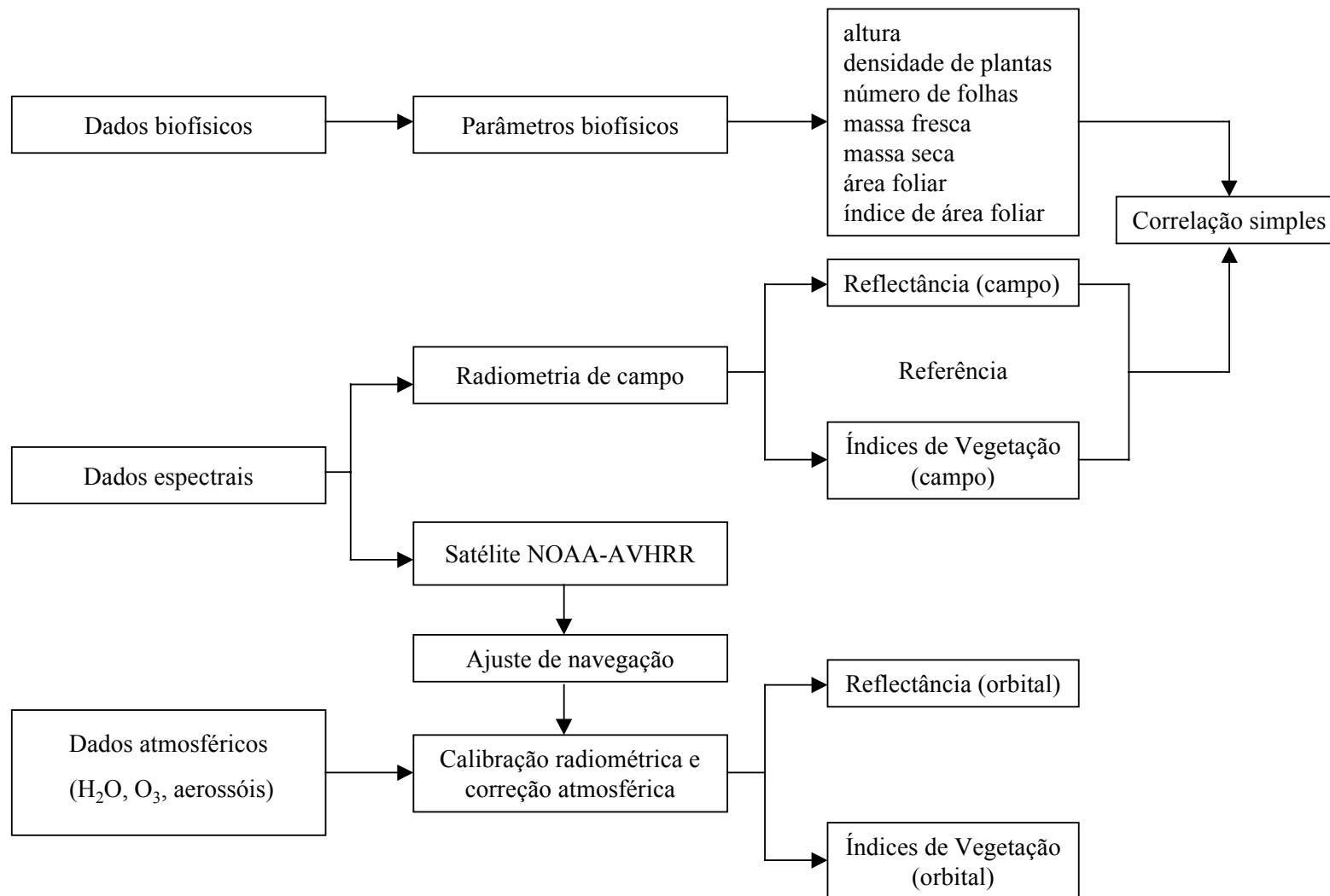


FIG. 3.3 – Fluxograma da metodologia.

3.4.1. DADOS BIOFÍSICOS DA CULTURA

As medidas biofísicas foram obtidas ao longo do crescimento da cultura nos cinco pontos amostrais da área de estudo.

Para a coleta das plantas no campo, foram definidas parcelas, delimitadas por uma armação ou esquadro de dimensões de 1,0m x 1,0m, de forma a conter cinco linhas de plantas.

Os estádios de crescimento da planta foram definidos segundo a escala de estádios de desenvolvimento de cereais de Feekes, modificado por LARGE (1954). A escala de Feekes foi adotada por ser a escala de estágio numérico mais conhecida e largamente empregada em trabalhos científicos. Nessa escala, o desenvolvimento da planta é dividido nas fases de perfilhamento, alongamento, espigamento e maturação. No entanto, para fins de maior detalhamento do ciclo da cultura, definiu-se, neste trabalho, por acrescentar mais uma fase, correspondente ao período de semeadura à emergência, perfazendo um total de cinco fases.

Os seguintes parâmetros de crescimento foram determinados: altura, densidade de plantas, número de folhas, fitomassa (massas fresca e seca da parte aérea da planta e de folhas), área foliar e índice de área foliar (IAF), ao longo do desenvolvimento da cultura, nas datas das campanhas.

A determinação da altura do dossel de plantas foi realizada medindo-se a partir da superfície do solo até o topo do dossel, utilizando uma média de cinco plantas por parcela. Com o surgimento das primeiras espigas, na medição da altura média da planta levou-se em consideração a distância do nível do solo ao ápice da espiga, mantendo as plantas distendidas e excluindo-se as aristas.

As plantas das três linhas centrais de cada parcela foram coletadas para a caracterização agrônômica da cultura. As plantas eram cortadas ao nível do solo e colocadas em sacos plásticos e transportadas em caixas térmicas resfriadas, a fim de prevenir a perda de umidade. O material coletado era conduzido ao laboratório da Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI, da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP, onde foram realizadas as medições pertinentes.

Foi determinado o número de plantas das três linhas de plantas por parcela. Para as outras medidas biofísicas foi obtida uma amostra de 20 plantas escolhidas aleatoriamente do total da parcela.

A densidade ou o número de plantas por unidade de área foi estimada convertendo o número de plantas das três linhas coletadas por parcela para as cinco linhas contidas em 1m^2 .

O número de folhas verdes por planta foi obtido da média das 20 plantas amostradas por parcela. Foram consideradas as folhas com altura igual ou superior a 1cm, a partir da bainha.

A matéria fresca foi determinada em balança semi-analítica, marca Marte, modelo A-1000, com precisão de 0,01g. O material verde, acondicionado em bandejas de alumínio era posto a secar em estufa com ventilação forçada a 70°C , até que sua massa permanecesse constante, em média de 24 a 48 horas, com hastes, folhas e espigas separadas em diferentes bandejas.

A fitomassa da parte aérea das plantas por unidade de área foi estimada convertendo as massas fresca e seca das três linhas centrais de plantas coletadas para as cinco linhas de plantas contidas em 1m^2 . A parte aérea da planta é composta de folhas verdes, haste e espigas. A fitomassa por planta é a massa média das 20 plantas amostradas por parcela.

Na determinação da área foliar foi utilizado o aparelho integrador óptico de área, marca Lambda-Licor, modelo LI-3000, com precisão de $0,01\text{cm}^2$. Foram consideradas nas medições as folhas com altura igual ou superior a 1cm, a partir da bainha.

O índice de área foliar (IAF) é definido como a área foliar da planta por unidade de área de terreno, ocupada por ela (WATSON, 1952). Neste trabalho, foi considerado como unidade de área o espaçamento médio de cada planta.

Foi realizada uma análise de crescimento da cultura, utilizando-se dados biofísicos obtidos ao longo do ciclo da cultura. As equações de regressão foram calculadas para todas as variáveis biofísicas com relação à variável tempo, dias após o

plantio (DAP). O ajuste de equações dos dados experimentais foi obtido utilizando-se do programa computacional AJUSTE (ZULLO & ARRUDA, 1986). Dentre as funções disponíveis no programa, foram selecionadas oito para o ajuste dos dados experimentais, por serem consideradas as mais adequadas para este estudo: linear, exponencial, hiperbólica, logística, quadrática, cúbica, exponencial quadrática e exponencial cúbica (Tabela B.1, do Anexo B). As suposições de ajuste do modelo são possuir resíduos normais iguais a zero e variabilidade constante.

No ajuste das equações foram utilizados como dados de entrada os trinta e cinco dados experimentais para as variáveis biofísicas, excetuando a altura, com trinta elementos, e a massa fresca de folhas verdes por planta, com trinta e quatro. Os dados efetivamente utilizados no ajuste diferiram do número de dados de entrada, dependendo da equação de regressão escolhida pois, segundo ZULLO & ARRUDA (1986), algumas das funções apresentadas no programa computacional AJUSTE não são definidas para todos os valores de x e y , resultando na diminuição do número de pares de valores ajustados. É o caso dos modelos que se servem das funções inversa e logarítmica na transformação dos dados para o ajuste, que excluirão automaticamente os pontos situados no campo dos números reais em que os modelos não são definidos (Tabela B.1, do Anexo B).

A escolha do melhor ajuste baseou-se na simplicidade do modelo e no valor do coeficiente de determinação, R^2 , adotando-se o seguinte critério de classificação, a fim de facilitar a avaliação na escolha do ajuste:

- Coeficiente de determinação ótimo: maior ou igual a 90%;
 - Coeficiente de determinação bom: maior ou igual a 85% e menor que 90%;
- e
- Coeficiente de determinação suficiente: maior ou igual a 80% e menor que 85%.

A seguir, foi realizada a análise de variância e teste F, que consiste no emprego do teste de hipótese para a existência de regressão e construção de intervalos

de confiança para o modelo e seus parâmetros, segundo GREGORY (1973), MANDEL (1984) e FONSECA et al. (1985).

A verificação da adequação do ajustamento do modelo foi realizada pelo teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K.S.), considerando-se o nível de significância de $\alpha = 0,05$. Um teste não-paramétrico, segundo MILONE & ANGELINI (1993), avalia a concordância entre os valores teóricos esperados e os observados em um experimento. O teste K.S. para adequação de ajuste é especialmente útil com amostras pequenas e é aplicável para distribuições de frequência contínuas (SOKAL & ROHLF, 1995). Além disso, o teste K.S. é aplicável a seqüências de valores não agrupados, independente de uma estatística classificatória (estatística com dados agrupados). Neste estudo, o teste verifica a concordância entre os dados amostrais àqueles previstos pelo modelo escolhido, ou seja, se o modelo escolhido é adequado. Para se testar a validade do modelo por esse teste utilizou-se do programa STATGRAPHICS 6.0, da *Statistical Graphics Corporation* (STSC, 1987).

3.4.2. DADOS ESPECTRAIS

3.4.2.1. RADIOMETRIA DE CAMPO

As medidas de radiometria de campo foram obtidas ao longo do crescimento da cultura ao redor dos cinco pontos amostrais da área de estudo.

Na radiometria de campo foi utilizado um espectroradiômetro portátil modelo LI-1800, marca Licor, com medidas de radiação eletromagnética na faixa espectral de 400 a 1.100nm, em intervalos de 2nm. Esse equipamento proporciona espectros contínuos, de forma a possibilitar a reprodução de bandas de medida de muitos sensores, nesse intervalo de comprimento de onda. O equipamento é composto de três unidades básicas: corpo principal, terminal de acionamento e receptor de radiação.

O corpo principal possui a forma de uma caixa metálica, contendo a bateria, os sensores e os registradores. Esta unidade pesa 5kg e a bateria tem autonomia de, aproximadamente, 8 horas de trabalho de campo. Os dados são armazenados pelo microprocessador interno que possui 144Kb de memória, permitindo acumular até 100 espectros completos.

O terminal de acionamento tem a forma de uma caixa com um pequeno visor de cristal líquido e conjunto de teclas similar a um teclado de micro. Na transferência dos dados registrados, esse terminal foi substituído por um *notebook*, permitindo mais recursos computacionais.

Para os trabalhos de campo, foi utilizado o modelo remoto de receptor de radiação, conectando o receptor ao corpo principal através de um cabo de fibra ótica de 1,5m de comprimento. Nas medições fixas, realizadas em laboratório, foi utilizado o modelo de receptor padrão, acoplado diretamente ao corpo principal. Esses receptores são do tipo cosseno, de abertura ampla, da ordem de 180°, denominados de receptores hemisféricos, pois captam a energia vinda de todos os ângulos do hemisfério.

Nas campanhas, foram obtidas medidas de radiação global, radiação direta e reflectância da cultura, realizadas no período de duas horas antes e após a passagem

do satélite. As medições de radiação global e direta foram concentradas próximas ao horário da passagem do satélite, enquanto as de reflectância da cultura, realizadas nos pontos de amostragem da área, foram contínuas no intervalo de tempo.

O dado de radiação direta foi coletado para a determinação da concentração dos aerossóis, utilizada na metodologia de correção atmosférica, descrita a seguir. Os dados de radiação global foram coletados como forma opcional de se obter a radiação direta, quando por alguma razão esta medida não pudesse ser obtida.

A radiação solar global é toda radiação incidente no receptor hemisférico. A radiação solar direta foi obtida utilizando a metodologia desenvolvida por ZULLO (1994), adaptando ao aparelho LI-1800 um tubo acoplado ao receptor hemisférico, limitando o seu ângulo de abertura, de modo que o sensor receba apenas a radiação direta quando o conjunto tubo+receptor foi apontado para o sol. O tubo com base metálica foi feito de metal e pintado com tinta preta fosca, e conectado à placa-suporte do receptor remoto do espectroradiômetro através de parafusos. As dimensões do tubo são de 0,15m de altura, 0,0128m de diâmetro interno e 2,4° de ângulo de abertura (vide Fig. 3.4). Segundo ZULLO (1994), a vantagem da adoção dessa metodologia adaptada ao LI-1800 é a possibilidade de obter espectros de radiação direta com a mesma precisão e faixa espectral utilizada para medir a radiação global e a reflectância da cultura.

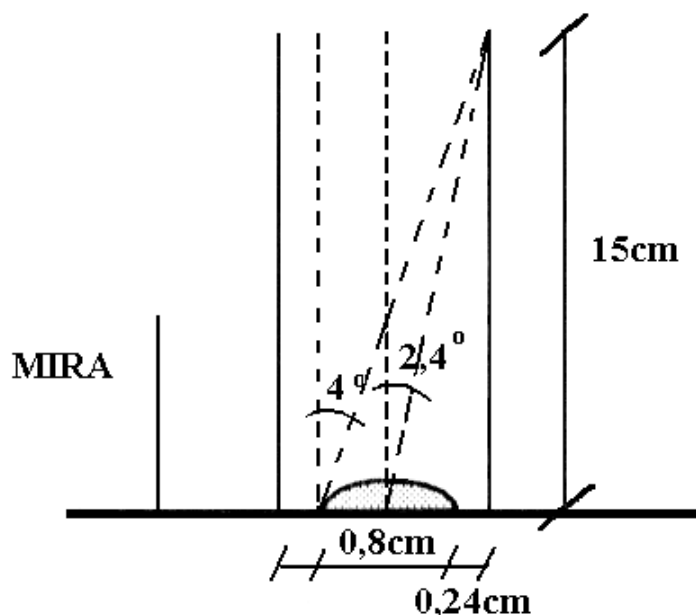


FIG. 3.4 – Dimensões do conjunto tubo+receptor hemisférico (Fonte: Adaptado de ZULLO, 1994).

As medidas de reflectância foram expressas como um fator de reflectância. Foi adotado o método de medidas sequenciais na determinação do fator de reflectância, que utiliza um único receptor de radiação. Esse método é baseado em medidas sequenciais de radiância refletida do alvo e de irradiância que incide no alvo. Segundo MILTON (1982), adotando-se o método de medidas sequenciais, é importante que o tempo gasto entre as duas medidas seja o menor possível. Procurando diminuir possíveis erros introduzidos por mudanças na iluminação, as medidas foram realizadas em dias completamente limpos, com a medida do painel de referência realizada logo antes ou após cada medida da superfície de estudo e repetindo essas medições de três a cinco vezes ao redor de cada ponto amostral. O tempo de varredura do espectroradiômetro na faixa de comprimento de onda de 400 a 1.100nm é de aproximadamente 1 minuto, sendo o tempo transcorrido entre duas varreduras consecutivas de dois minutos. Problemas foram observados com o cabo de fibra ótica nas últimas datas de trabalho de campo, provocados pela quebra de algumas fibras que levaram a perda de fluxo e a um aumento de ruído, causando a eliminação de algumas dessas medidas.

Para uso de campo, o espectroradiômetro foi adaptado em um suporte metálico, com o receptor de radiação montado cerca de 2,2m verticalmente acima do terreno, mantido horizontalmente, nivelado para uma visão nadir, conforme a Fig. 3.5. O braço que prendia o sensor tinha 1,3m de comprimento. Nas medidas de fator de reflectância do dossel foi acoplado um tubo ao receptor de radiação, de dimensões de 0,035m de altura, 0,014cm de diâmetro e $11,3^\circ$ de ângulo de abertura. A placa de referência foi colocada a 1,57m a partir do solo, com superfície de visada da placa de cerca de 0,25m de diâmetro. A área visada pelo sensor sobre a superfície do solo tinha diâmetro de aproximadamente 0,88m.



FIG. 3.5 - Espectroradiômetro adaptado em estrutura metálica utilizado para as determinações de fator de reflectância.

Foi adotado como painel de referência uma placa pintada com sulfato de bário (BaSO_4), de dimensões de 0,50m x 0,50m, de comportamento quase-lambertiano. A calibração do painel foi realizada em laboratório com o espectroradiômetro equipado com uma esfera integradora modelo 1800-12S, marca Licor, que utiliza o sulfato de bário como material de cobertura das paredes da esfera e do disco de amostra de

referência. A esfera integradora é um acessório que se destina à medição prática da reflectância, transmitância e absorbância dos materiais, sendo acoplado ao corpo principal do espectroradiômetro no lugar do receptor remoto de radiação, através do cabo extensor de fibra ótica (ZULLO, 1994). A faixa espectral de operação utilizada da esfera foi de 400 a 1.100nm. A partir da medida de reflectância da placa de referência foram deduzidos para cada comprimento de onda os coeficientes ponderados (fatores de calibração) a aplicar, a fim de obter a reflectância da superfície de estudo.

Para caracterizar os estádios vegetativos foram utilizados os índices espectrais mais conhecidos: razão (RATIO), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de vegetação transformado (TVI). Esses índices foram definidos a partir dos valores médios de reflectância calculados para as bandas espectrais do sensor AVHRR-NOAA, nos canais 1 (580 a 680nm) e 2 (725 a 1.100nm), respectivamente bandas do vermelho e do infravermelho próximo:

Índice de Vegetação por Razão (RATIO):

$$\text{RATIO} = \frac{\text{Canal 2}}{\text{Canal 1}}$$

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI):

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{Canal 2} - \text{Canal 1})}{(\text{Canal 2} + \text{Canal 1})}$$

Índice de Vegetação Transformado (TVI):

$$\text{TVI} = \sqrt{\left(\frac{\text{Canal 2} - \text{Canal 1}}{\text{Canal 2} + \text{Canal 1}} \right) + 0,5}$$

3.4.2.2. NOAA-AVHRR

A estação de recepção de imagens NOAA está localizada no Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura - CEPAGRI, da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, nas coordenadas 22°49'22"S e 47°03'59"O. A fim de minimizar os efeitos de distorção causados por grandes ângulos de visada do sensor do satélite, os critérios utilizados na seleção das imagens foram os de apresentar a direção do centro da passagem a oeste da antena de recepção terrestre e o ângulo de elevação superior a 60°.

Foram utilizadas as imagens obtidas nos canais 1 (580 a 780nm) e 2 (725 a 1.100nm), respectivamente as faixas espectrais vermelho e infravermelho próximo.

As imagens foram obtidas entre maio e agosto de 1995 e algumas de suas características orbitais estão apresentadas na Tabela 3.2. No período do experimento, eram disponíveis as imagens de passagens diurnas dos satélites NOAA-9 e NOAA-14, porém no último mês de trabalho de campo, o satélite NOAA-9 foi desativado (3 de agosto de 1995). As imagens selecionadas neste trabalho foram, em sua maioria, obtidas do satélite NOAA-14, excetuando a de 22 de junho, com o NOAA-9. As passagens diurnas do NOAA-14 sobre a região de estudo ocorrem no período da tarde, aproximadamente às 17:00 GMT (*Greenwich Mean Time*), horário local 14:00 horas (GMT menos 3:00 horas - Zona Brasília). As passagens diurnas do NOAA-9 ocorriam no período da manhã, aproximadamente às 12:00 GMT, quando na região é geralmente observada uma nebulosidade, provocada pela proximidade da área à represa de Jurumirim, fato que dificultou a obtenção de imagens de boa qualidade desse satélite.

Os dados do satélite NOAA recebidos na estação terrestre de imagens no CEPAGRI são gerenciados e armazenados na estação de trabalho METPRO da *General Sciences Corporation* (GSC). A partir dos dados transmitidos à estação terrestre em tempo real dos satélites NOAA são gerados setores de imagem HRPT (*High Resolution Pictures Transmission*) AVHRR e as sondagens TOVS (*TIROS Operacional Vertical Sounder*) recuperadas (GSC, 1992). As imagens AVHRR são

recebidas no formato de 10 bits e quando são setorizadas, calibradas e armazenadas, o METPRO as transforma em arquivos de 8 bits.

TABELA 3.2 – Dados de passagens pré-selecionadas do satélite NOAA sobre a antena de recepção localizada em Campinas, SP

Data	Dias decorridos no ano	Satélite	Horário (GMT*)	Passagem	Direção	Ângulo de Elevação (°)
23 maio	143	NOAA-14	16:58	Ascendente	Oeste	87,7
31 maio	151	NOAA-14	17:13	Ascendente	Oeste	62,6
22 junho	173	NOAA-9	12:19	Descendente	Oeste	82,4
28 junho	179	NOAA-14	17:12	Ascendente	Oeste	64,7
26 julho	207	NOAA-14	17:12	Ascendente	Oeste	66,7
14 agosto	226	NOAA-14	17:09	Ascendente	Oeste	74,6

* GMT (*Greenwich Mean Time*)

As passagens pré-selecionadas foram setorizadas utilizando a projeção cartográfica latitude e longitude e foi definida a área geográfica das imagens com o centro do setor em 22°30'00"S e 48°30'00"O, com resolução de 1024 por 1024 pixels, abrangendo o Estado de São Paulo, conforme exemplo na Fig. 3.1, obtendo-se as imagens dos canais 1 e 2 em cada data selecionada. A seguir, as imagens foram certificadas quanto à existência de nuvens ou sombras sobre a área de estudo, visualizando-se os canais 1 e 2. Das seis imagens inicialmente selecionadas, foram desconsideradas duas: as dos dias 31 de maio e 22 de junho de 1995, por problemas de nuvens.

No processo de setorização, o METPRO realiza o geo-referenciamento das imagens, baseado nas informações armazenadas da órbita dos satélites. Os parâmetros da órbita são obtidos da NOAA e semanalmente esses dados são atualizados. Além

disso, para o melhor ajuste do geo-referenciamento, foi utilizado o programa de navegação disponível no sistema, que corrige e ajusta pequenas distorções no registro de navegação utilizando a transformação baseada em pontos de controle no terreno ou marcas terrestres, sendo a correção da distorção geométrica realizada através do método de quadrados mínimos (GSC, 1992).

As marcas terrestres foram definidas pelos pontos visíveis na banda do infravermelho próximo, canal 2, e identificáveis nas cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de acordo com a metodologia adotada por ALMEIDA (1996). Foram selecionados vinte e sete pontos, principalmente ao redor de grandes corpos d'água, tais como rios e represas. Dependendo das condições das imagens (presença de nuvens), foram utilizadas de nove a vinte e sete marcas terrestres, inseridas em arquivos referentes a cada imagem. Como resultado do ajuste, foram apresentadas informações sobre a estatística (erro) de cada marca terrestre e dos parâmetros de navegação.

Foi utilizada a represa de Jurumirim como referência das marcas terrestres mais próximas à área de estudo. As posições geográficas desses pontos de controle no terreno, no total de nove, foram obtidas das cartas de Cerqueira César (SF-22-Z-D-I-2), Itai (SF-22-Z-D-I-4), Jurumirim (SF-22-Z-D-II-3) e Paranapanema (SF-22-Z-D-II-4), na escala de 1:50.000. Distribuídas no Estado de São Paulo, foram identificadas outras dezoito marcas terrestres e suas posições geográficas foram obtidas das cartas de Andradina (SF-22-V-B), Dracena (SF-22-V-D), São José do Rio Preto (SF-22-X-B), Araraquara (SF-22-X-D), Franca (SF-23-V-A) e Curitiba (SG-22-X-D/SG-23-V-C MIR-514/515), na escala de 1:250.000.

Posteriormente, foi utilizado o sistema computacional SCORADIS (ZULLO, 1994), que realiza a correção radiométrica das imagens de satélite, obtendo-se os produtos finais com a calibração radiométrica e a correção atmosférica. Na calibração os valores de nível de cinza foram convertidos para reflectância, utilizando-se das fórmulas segundo RAO & CHEN (1999). A correção atmosférica, segundo o modelo 5S (TANRÉ et al., 1990), foi realizada a fim de diminuir os efeitos aditivos indesejáveis sobre os níveis de cinza das imagens orbitais, devidos aos efeitos de

absorção e de espalhamento causados pelos aerossóis, gases e moléculas d'água da atmosfera.

Os dados de entrada do sistema SCORADIS são: data e horário de passagem do satélite NOAA-14 sobre o local considerado, localização (latitude e longitude) do local, coluna do pixel (*master pixel*) da imagem bruta (*raw data*), longitude e horário de passagem do nodo ascendente do satélite no Equador, conteúdo de vapor d'água e de ozônio na atmosfera e espessura ótica dos aerossóis à 550nm.

As informações sobre a passagem do nodo ascendente do satélite sobre o Equador foram obtidas no programa computacional WINORBIT 3.2, de estimativa e visualização da órbita do satélite, da *C. D. Gregory, K8CG*, utilizando o arquivo em formato “*Two-Line*”, dos elementos orbitais ou Keplerianos do satélite NOAA-14 de um dia anterior às datas de passagem.

O conteúdo de vapor d'água foi estimado a partir da radiação solar direta obtida nas datas de radiometria de campo, utilizando a metodologia apresentada por ZULLO et al. (1996). O conteúdo de ozônio varia com a latitude do local e os meses do ano e foi obtido em LONDON et al. (1976). A espessura ótica foi obtida segundo metodologia apresentada em ZULLO (1994).

Foi utilizado o programa computacional de processamento de imagens ENVI 3.2 da *Better Solutions Consulting LLC*, para extrair os valores de fator de reflectância dos canais 1 (580 a 680nm) e 2 (725 a 1.100nm) das imagens.

3.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DADOS BIOFÍSICOS E ESPECTRAIS

Foram estudadas as inter-relações entre as características espectrais e os atributos biológicos da cultura, através da análise de correlação simples entre as variáveis biofísicas e espectrais, coletadas por radiometria de campo (fator reflectância nos canais 1 e 2, RATIO, NDVI e TVI). O teste t foi aplicado para verificar significância da correlação. Essas análises foram realizadas com o programa computacional STATGRAPHICS 6.0 (STSC, 1987).

Os dados espectrais obtidos da radiometria de campo foram consideradas como a referência terrestre das imagens NOAA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DADOS METEOROLÓGICOS E DO SOLO

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, lâmina de água aplicada por irrigação e umidade do solo no período de abril a agosto de 1995 estão apresentados na Fig. 4.1. Os dados de umidade relativa do ar nos meses de abril e maio não puderam ser obtidos por problemas no equipamento.

No início do ciclo de crescimento da cultura, as temperaturas médias do ar estiveram entre 15°C e 25°C. Depois, a partir de 19 de maio, com o trigo no estágio final do perfilhamento, as temperaturas médias diminuíram, ficando geralmente entre 15°C e 20°C, com uns poucos dias de temperaturas médias inferiores a 15°C. Mais para o final do ciclo, a partir do dia 11 de julho, no estágio de espigamento, novamente as temperaturas médias se elevaram entre 15°C e 25°C, porém com grande oscilação, com curtos períodos de alta temperatura intercalados com outros períodos de baixa.

As temperaturas ocorridas neste estudo pareceram não ter afetado prejudicialmente o desenvolvimento da cultura, pois estiveram em geral nas faixas de temperatura ótima segundo MOTA (1989), que cita que a temperatura ótima para o desenvolvimento da folha está entre 20°C e 25°C e para o perfilhamento entre 15°C e 20°C. Além disso, as temperaturas mínimas no período foram sempre superiores a 5°C, considerada a temperatura mínima de crescimento (MOTA, 1989).

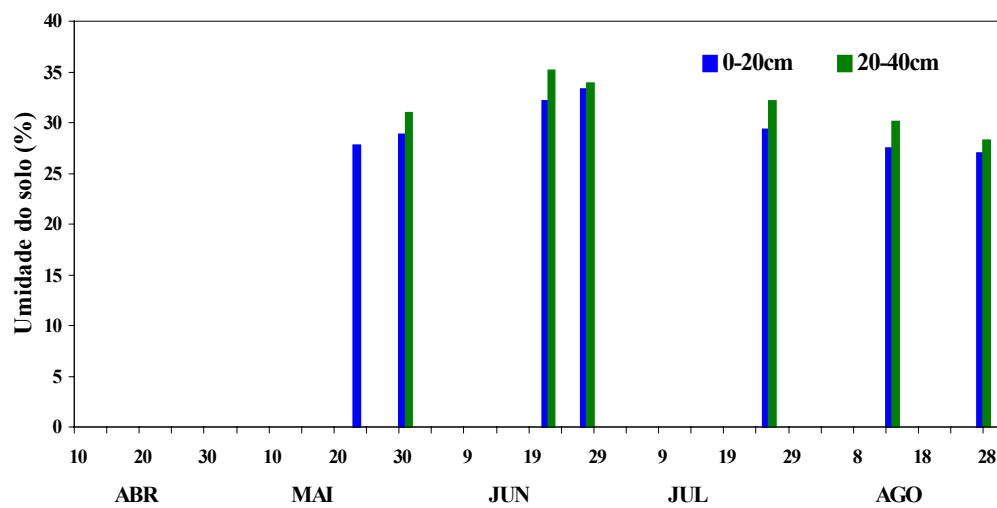
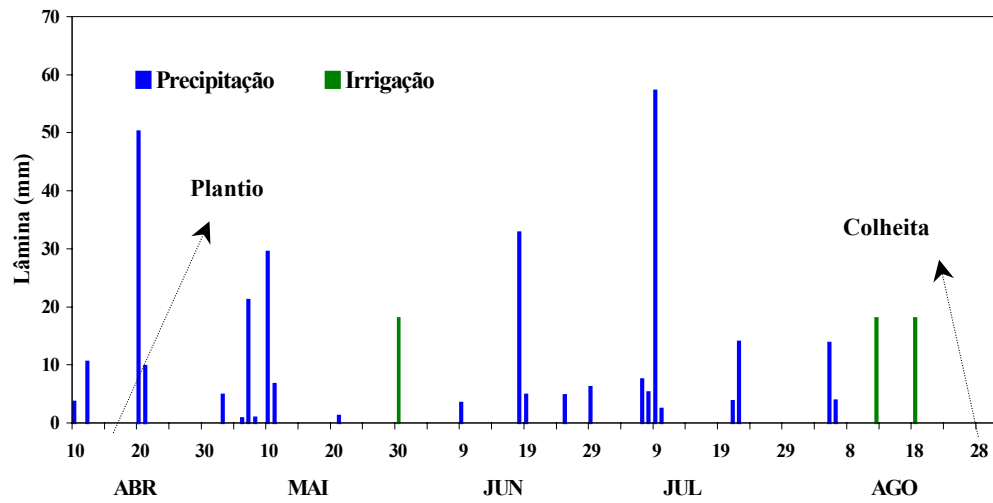
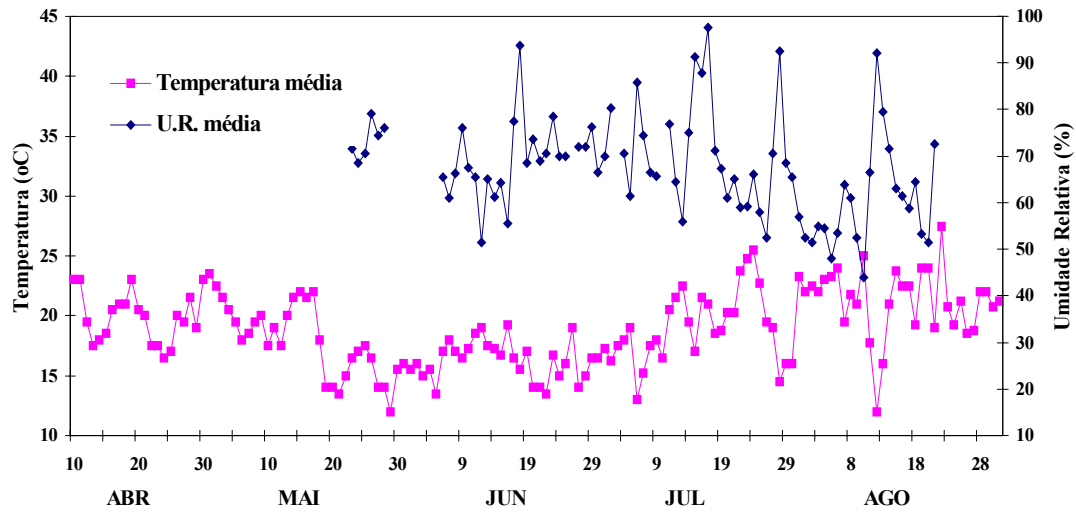


FIG. 4.1 – Temperatura e umidade relativa médias do ar, precipitação, irrigação e umidade do solo no período de abril a agosto de 1995.

Da Fig. 4.1 pode-se observar também que no ciclo de desenvolvimento do trigo a cultura não sofreu estresse de água, pois o sistema de irrigação supriu as demandas de água nos períodos de escassez.

Os dados de umidade do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40cm são os coletados nas datas de campanha. Como característica do solo da área de estudo, houve maior retenção de água na camada inferior de 20-40cm.

4.2. DADOS BIOFÍSICOS

O desenvolvimento do trigo quanto ao seu comportamento agrônomo foi avaliado pelos seguintes parâmetros de crescimento: altura, densidade de plantas, número de folhas verdes, fitomassa (massas fresca e seca da parte aérea da planta, constituída de folhas verdes, colmos e espigas, e massas fresca e seca das folhas verdes separadamente), área foliar e índice de área foliar (IAF). Os resultados estão apresentados nas Tabelas A.1 a A.11 , do Anexo A.

Ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, foi possível realizar sete campanhas de coleta dos parâmetros de crescimento. Em cada data, os dados biofísicos foram coletados e associados ao estágio de desenvolvimento do trigo da escala de Feekes (vide Tabela 4.1 e Fig. 4.2).

O ciclo de desenvolvimento da cultura apresentou duração total de 135 dias. Na primeira fase do desenvolvimento, o perfilhamento iniciou 19 dias após o plantio e teve duração aproximada de 26 dias. Na segunda fase, o alongamento, teve duração de 26 dias. Na fase seguinte, o espigamento, ocorreu no período de 22 dias e a última fase, a maturação, compreendeu 42 dias.

A duração do ciclo da cultura foi superior à média de 120 dias, citado por FELÍCIO et al. (1988), para o cultivar "Tucuruí", assim como todas as fases de desenvolvimento ocorreram nos limites superiores das faixas de duração média de tempo para as variedades nacionais de trigo, citadas por CAMARGO & FELÍCIO (1990), SOARES SOBRINHO & SOUZA (1983) e SILVA et al. (1996), possivelmente pelas condições climáticas do local, na época do experimento.

A produtividade final de grãos foi de 2.760kg/ha, bem acima da produtividade média do Estado de São Paulo, de 1.716kg/ha (Tabela 2.4).

TABELA 4.1 - A data, dias decorridos no ano (DDA), dias após o plantio (DAP) e o correspondente estágio fenológico da cultura, nas sete campanhas de campo

Data	DDA	DAP	Estádio fenológico⁷ (escala de Feekes)
23 maio	143	38	Perfilhamento. Estádio 5 – Pseudocaule (formado por bainhas foliares) fortemente desenvolvido.
31 maio	151	46	Início de alongamento. Estádio 6 – Primeiro nó do colmo visível na base da gema.
22 junho	173	68	Alongamento. Emborrachamento. Estádio 10 – Bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não são visíveis.
28 junho	179	74	Início de espigamento. Estádio 10.2 – Um quarto do processo de espigamento completo.
26 julho	207	102	Início de maturação. Estádio 11.2 – Grãos no estágio de massa macia, mas seca.
14 agosto	226	121	Maturação média. Estádio 11.3 – Grãos duros.
28 agosto	240	135	Maturação final. Estádio 11.4 – Maturação de colheita. Palhas secas.

A análise descritiva dos dados foi baseada em gráficos dos parâmetros biofísicos, em função de dias após o plantio (DAP).

As equações de ajuste dos dados experimentais estão apresentadas nas Tabelas B.2 a B.12, do Anexo B. A escolha de cada modelo foi realizada segundo os critérios de simplicidade do modelo, do valor do coeficiente de determinação (R^2), conjugados à comprovação da validação dos modelos escolhidos, através da análise de variância e teste F e da adequação de ajustamento dos modelos, por meio do teste K.S.. Nas Tabelas C.1 a C.10, do Anexo C, estão apresentados os resultados do teste F e na Tabela D.1, do Anexo D, os resultados do teste K.S. dos modelos escolhidos para cada variável biofísica.

⁷ Informação pessoal do Pesq. Dr. José Guilherme de Freitas - IAC

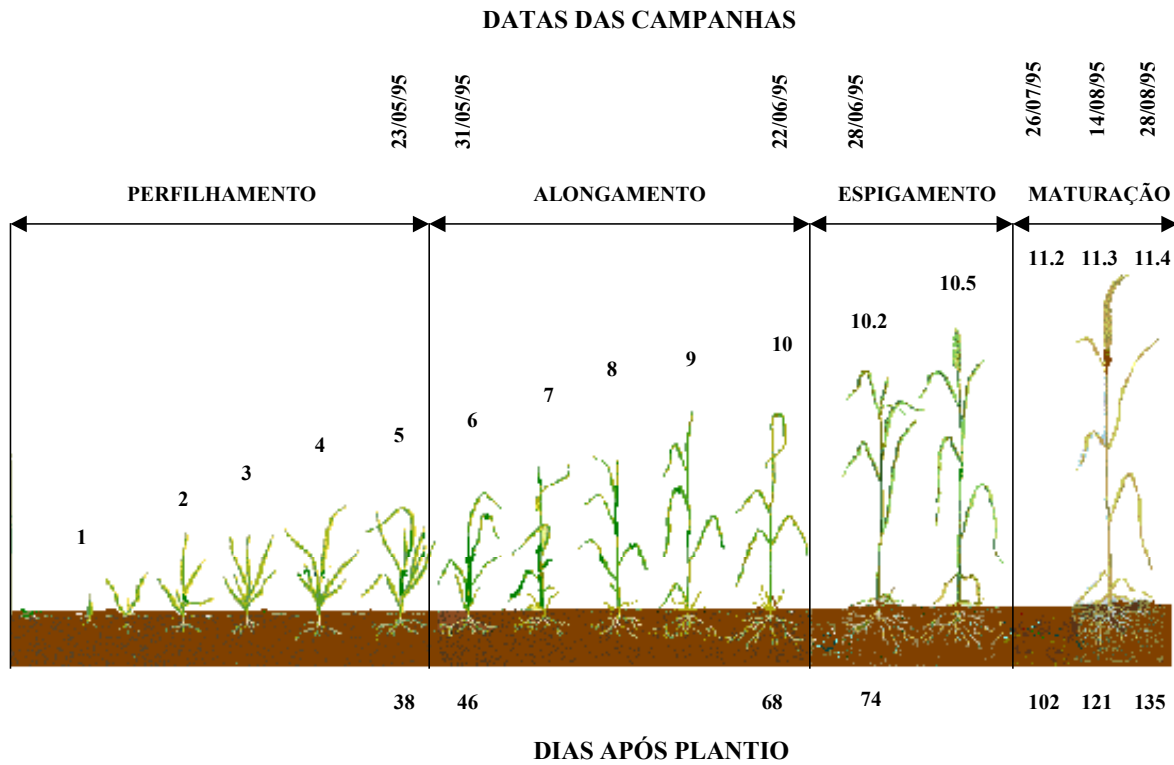


FIG. 4.2 - Estádios de desenvolvimento do trigo na escala de Feekes e datas correspondentes das campanhas de campo. Adaptado de ilustração de LARGE (1954).

4.2.1. ALTURA

Na Fig. 4.3 está apresentada a curva de crescimento da altura da planta. Pela análise da Fig. 4.3, observou-se um crescimento acentuado próximo ao início do desenvolvimento da cultura e, posteriormente, começou a se estabilizar até à colheita, estando de acordo com os resultados encontrados por FORMAGGIO (1989) e VALERIANO (1992). As maiores taxas de crescimento em altura foram observadas entre o início do alongamento - estágio 6 (Tabela 4.1) e, aproximadamente, o início do espigamento (10.2), de 46 a 74 DAP. A partir dos 74 DAP, observou-se ainda o crescimento em altura, porém em taxas menores, sendo o valor máximo de 93,34 cm, atingido aos 121 DAP, na maturação média (11.3), quando os grãos se encontravam duros. A altura obtida neste estudo é superior à altura média de 80 cm, descrito por FELÍCIO et al. (1988), como característico do cultivar IAC-24 – Tucuruí. A equação de regressão escolhida para a variável altura em função de DAP foi a quadrática, com coeficiente de determinação considerado ótimo ($R^2 = 0,9094$), nos limites de 46 a 135 DAP.

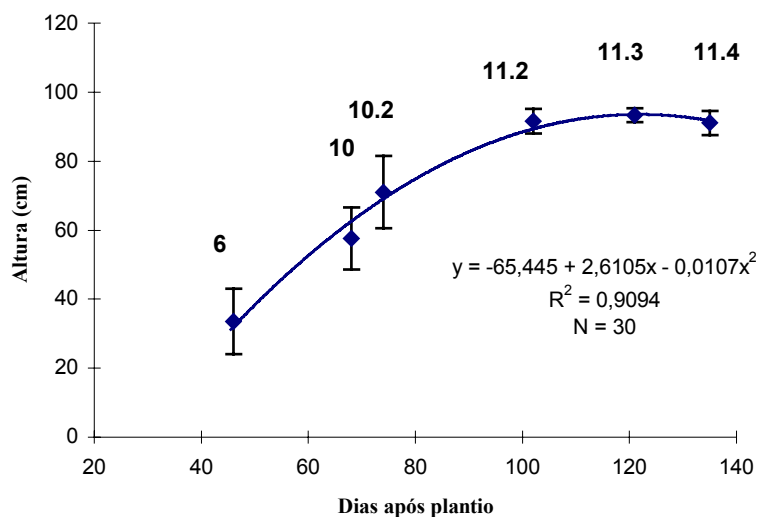


FIG. 4.3 – Altura (cm) do trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.2.2. DENSIDADE DE PLANTAS

Os dados médios de número de plantas por unidade de área, ao longo do tempo estão apresentados na Fig. 4.4. O número de plantas por área apresentou valor máximo próximo ao início do desenvolvimento da cultura, diminuindo ao longo do tempo, até atingir o mínimo na maturação final. Este comportamento também foi observado por FONTOURA et al. (1988) com o cultivar IAC-24 – Tucuruí. O valor máximo foi observado aos 46 DAP, no início do alongamento – estágio 6 (Tabela 4.1), com o primeiro nó do colmo visível na base da gema, com média de 246,34 plantas/m² e o valor mínimo na maturação final (11.4), aos 135 DAP, com 90,0 plantas/m². Para esta variável não foi escolhida uma equação de regressão dos dados experimentais, pois das oito funções definidas neste estudo, todas tiveram coeficientes de determinação inferiores a 80%, considerados portanto insuficientes pelo critério adotado (pág. 41).

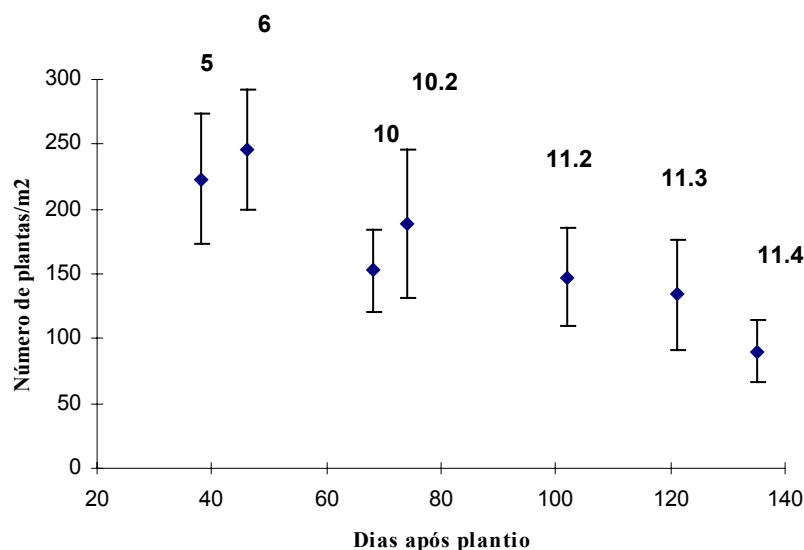


FIG. 4.4 - Número de plantas por metro quadrado do trigo cv. IAC-24 – Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.2.3. NÚMERO DE FOLHAS

Na Fig. 4.5, estão apresentados os resultados médios de número de folhas verdes por planta, durante o período experimental. Foi observado no início do ciclo de desenvolvimento da cultura um aumento acentuado no número de folhas por planta até atingir o máximo e, posteriormente, um declínio contínuo até o valor mínimo no ponto de colheita. Comportamento semelhante foi observado por FORMAGGIO (1989). O valor máximo foi observado aos 68 DAP, no emborrachamento – estágio 10 (Tabela 4.1), com a bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não visíveis, com média de 14,38 folhas verdes/planta. A equação de regressão escolhida para esta variável foi a exponencial quadrática, com coeficiente de determinação considerado bom ($R^2 = 0,8942$), nos limites de 38 a 135 DAP.

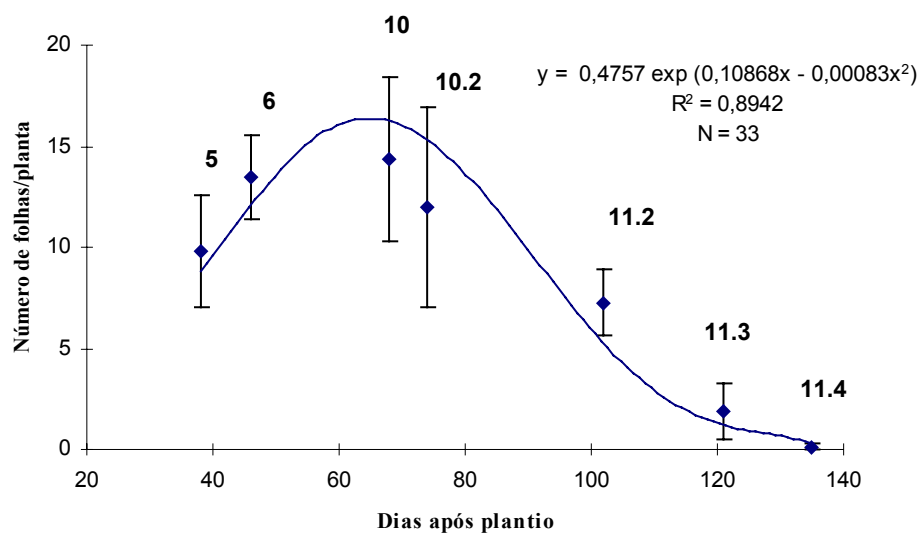


FIG. 4.5 - Número de folhas verdes por planta de trigo cv. IAC-24 – Tukurui, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.2.4. FITOMASSA

Na análise da fitomassa foram mensuradas as massas fresca e seca da planta e das folhas verdes. A massa da planta corresponde a massa total da parte aérea da planta, composta de folhas verdes, colmo e espiga. Foram avaliadas as produções da planta por unidade de área do terreno (g/m^2) e por planta e de folhas verdes por planta.

4.2.4.1. MASSA FRESCA

Na Fig. 4.6, estão apresentados os resultados médios da massa fresca da planta por área, ao longo do tempo. Foi observado um crescimento acentuado próximo ao início do ciclo da cultura até meados da metade do ciclo, quando começou a se estabilizar, atingindo o máximo de produção de matéria fresca da planta por unidade de área e, posteriormente, decresceu até o ponto de colheita. Este resultado é concordante com os obtidos por BARET (1986), FORMAGGIO (1989) e VALERIANO (1992). Altas taxas de ganho de massa fresca foram observadas entre o perfilhamento – estágio 5 (Tabela 4.1) e próximo ao espigamento (10.2), de 38 a 74 DAP. A partir dos 74 DAP, a massa fresca começou a se estabilizar, ainda com o comportamento crescente, até atingir o valor médio máximo de $2.489,31\text{g/m}^2$, aos 102 DAP, no início da maturação (11.2), quando os grãos estão com massa macia, porém seca. Na maturação de colheita (11.4), com as palhas secas, a massa fresca foi de $1.386,46\text{g/m}^2$, aos 135 DAP. A queda em matéria fresca foi devida à senescência da planta. A equação de regressão escolhida para a variável massa fresca da planta por área foi a quadrática, com coeficiente de determinação bom ($R^2 = 0,8564$), nos limites de 38 a 135 DAP.

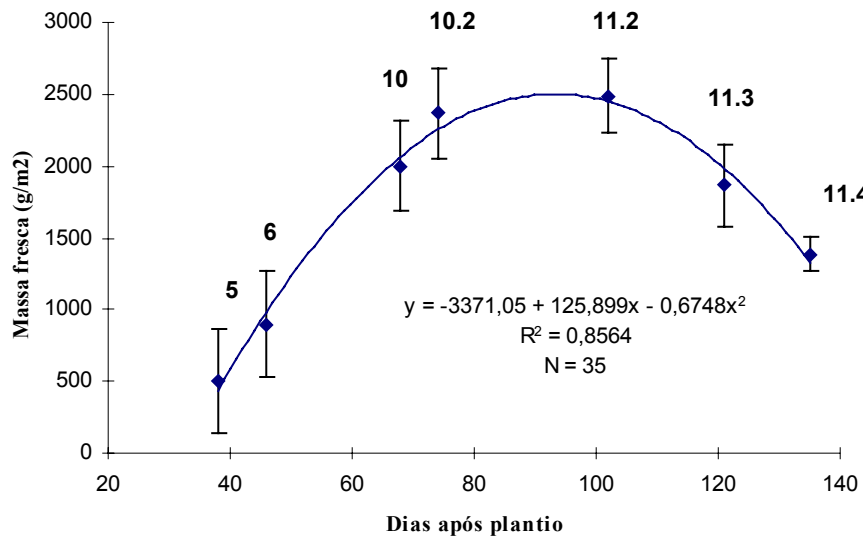


FIG. 4.6 - Massa fresca média da planta (g/m^2) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1\text{DP}$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

Na Fig. 4.7, estão apresentados os dados médios da massa fresca da parte aérea da planta por planta, durante o período experimental. As curvas de crescimento da massa fresca por planta e por área apresentaram comportamentos similares entre si, apesar da variação da densidade de plantas ao longo do desenvolvimento da cultura. O valor máximo obtido foi de 19,83g/planta, também aos 102 DAP, no início da maturação – estágio 11.2 (Tabela 4.1), quando os grãos estão com massa macia, porém seca. Na maturação final, no ponto de colheita, a matéria fresca da planta foi de 16,90g/planta. O ajuste escolhido para a variável massa fresca da parte aérea por planta em função de DAP foi a exponencial quadrática, com coeficiente de determinação considerado suficiente ($R^2 = 0,8174$), nos limites de 38 a 135 DAP.

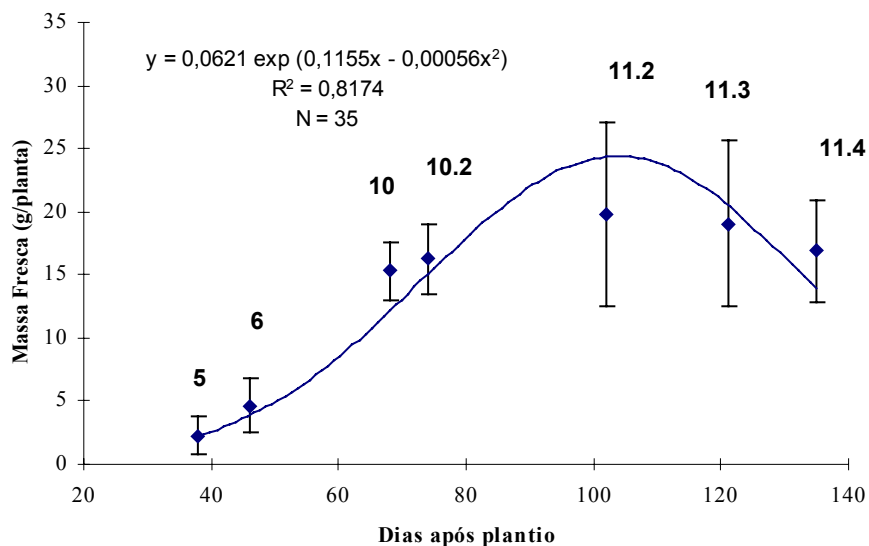


FIG. 4.7 - Massa fresca média por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

Na Fig. 4.8 estão apresentadas as curvas de crescimento da massa fresca da parte aérea da planta e das folhas por planta. O máximo de matéria fresca das folhas ocorreu no emborrachamento – estágio 10 (Tabela 4.1), aos 68 DAP, com a bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não visíveis, enquanto o máximo de matéria fresca da planta, composta de folhas, colmo e espiga, ocorreu no início da maturação (11.2), aos 102 DAP. Isso significa que durante esses estádios, a partir do emborrachamento até o início da maturação, seguiu-se a translocação da matéria fresca das folhas às outras partes da planta, colmo e cabeça, principalmente devido à formação e enchimento dos grãos. A partir do início da maturação (11.2), a acumulação de matéria fresca das folhas e da planta diminuíram à medida que a planta amadureceu, até atingir o ponto de colheita. A equação de regressão escolhida para a variável massa fresca das folhas por planta foi a exponencial cúbica, com coeficiente de regressão bom ($R^2 = 0,8911$), nos limites de 38 a 135 DAP.

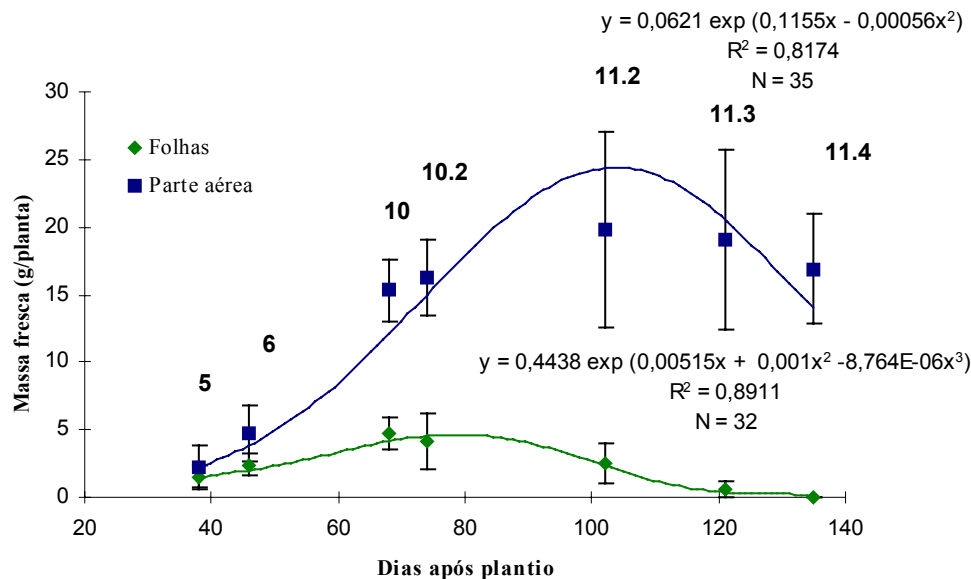


FIG. 4.8 - Massas frescas médias de folhas verdes (g/planta) e da parte aérea por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 - Tucuuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.2.4.2. MASSA SECA

Os dados médios de massa seca da planta por área, ao longo do tempo, estão apresentados na Fig. 4.9. A acumulação de matéria seca da planta por área foi crescente desde o início do período experimental até o máximo observado na fase de maturação fisiológica e, depois, um pequeno decréscimo até a maturação final. Esse comportamento é concordante, em parte, com o observado por Gasser & Thorburn (1972) e Talibudden et al. (1976), apud PAGE et al. (1977), para o trigo de primavera, KARLEN & WHITNEY (1980) para o trigo de inverno e por FONTOURA et al. (1988), para o IAC-24 - Tucuuruí em regime de sequeiro, que obtiveram o máximo da matéria seca da planta por área na maturação fisiológica, porém um pouco antes da maturação final. AASE (1978), BARET (1986), VALERIANO (1992) e FONTOURA et al. (1988), este último para o IAC-24 em regime irrigado, observaram o acúmulo de matéria seca da planta por área sempre crescente por todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, com o máximo obtido na maturação final.

O máximo de massa seca da planta foi obtido na maturação média – estágio 11.3 (Tabela 4.1), quando os grãos se encontravam duros, aos 121 DAP, com média de 682,17g/m² e no ponto de colheita, a massa seca da planta foi de 664,74g/m², uma diminuição de cerca de 2,56%. FONTOURA et al. (1988) obtiveram para o cultivar IAC-24, em regime irrigado, uma produção máxima de matéria seca da planta de 1.017,88g/m², valores bem superiores ao máximo obtido neste estudo. A equação de regressão escolhida para a variável massa seca da planta por área foi a linear, com coeficiente de determinação considerado bom ($R^2 = 0,8705$), comprovando uma tendência da acumulação da matéria seca próxima da linear, durante o período experimental, nos limites de 38 a 135 DAP.

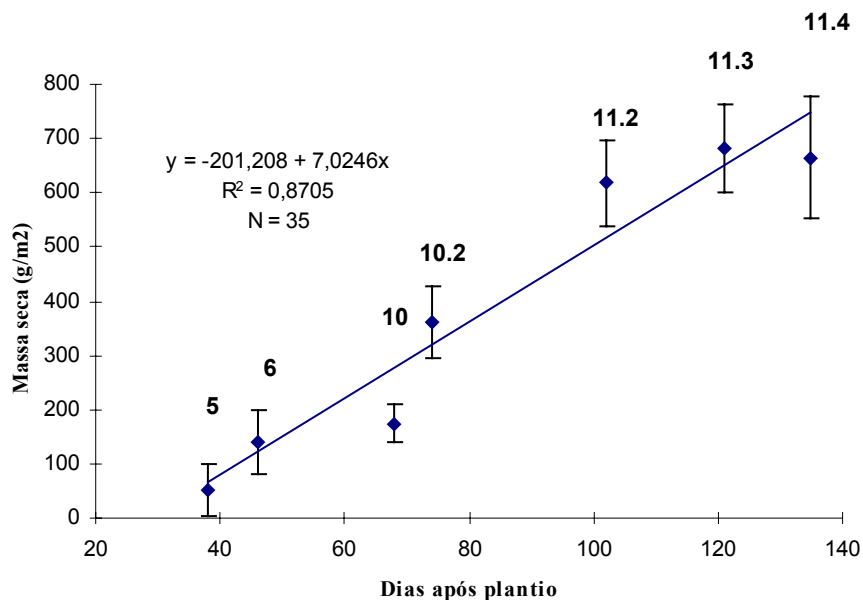


FIG. 4.9 - Massa seca média da planta (g/m²) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam estágio de desenvolvimento.

Na Fig. 4.10, estão apresentados os dados médios da massa seca da parte aérea por planta, durante todo o período experimental. O acúmulo de matéria seca da planta foi crescente durante todo o período experimental, com o máximo obtido na maturação final.

Esse resultado é concordante com o obtido por WALDREN & FLOWERDAY (1979) para o trigo de inverno e FONTOURA et al. (1988) para o IAC-24 em regime irrigado. De uma forma geral, a massa seca da parte aérea por área e por planta tiveram comportamentos similares, exceto a pequena variação próxima à maturação final. A equação de regressão escolhida para a variável massa seca da parte aérea por planta foi a linear, com coeficiente de regressão ótimo ($R^2 = 0,9063$), nos limites de 38 a 135 DAP.

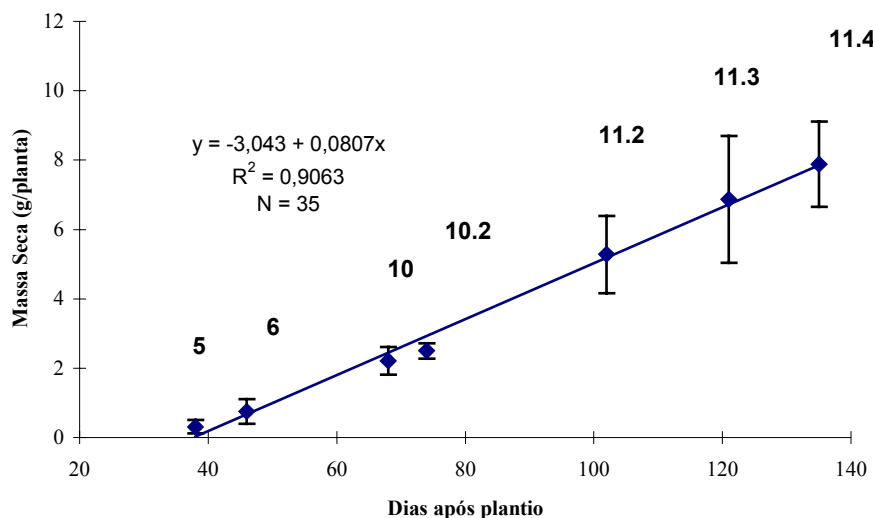


FIG. 4.10 - Massa seca média por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

Os dados de massa seca de folhas e da parte aérea por planta, nas sete datas de amostragem, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo, estão apresentados na Fig. 4.11. Foi observado um crescimento em massa seca de folhas verdes no início do período experimental até se atingir o máximo de produção no emborrachamento – estágio 10 (Tabela 4.1), com a bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não visíveis, aos 68 DAP, com 0,876g/planta, e, depois, decresceu até a maturação final. O decréscimo em massa seca de folhas foi mais acentuado na fase entre o início da maturação (11.2) e a maturação média (11.3).

Embora o comportamento da curva de crescimento de massa seca de folhas seja similar, isto é, crescimento até atingir o máximo e posterior declínio, o resultado é, em parte, discordante com o obtido por WALDEN & FLOWERDAY (1979), considerando que obtiveram o máximo de matéria seca de folhas por planta no florescimento e queda mais acentuada no desenvolvimento dos grãos, e por AASE (1978) e KARLEN & WHITNEY (1980), que obtiveram o máximo de matéria seca de folhas por área no estágio de alongamento (8). Da Fig. 4.11, observou-se que após o máximo de produção no emborrachamento (10), ocorreu a translocação da matéria seca das folhas para as outras partes da planta, colmo e espigas, principalmente das folhas para os grãos, na fase de maturação da planta. A equação de regressão escolhida para a variável massa seca de folhas por planta em função de DAP foi a exponencial cúbica, com coeficiente de determinação considerado bom ($R^2 = 0,8640$), nos limites de 38 a 135 DAP.

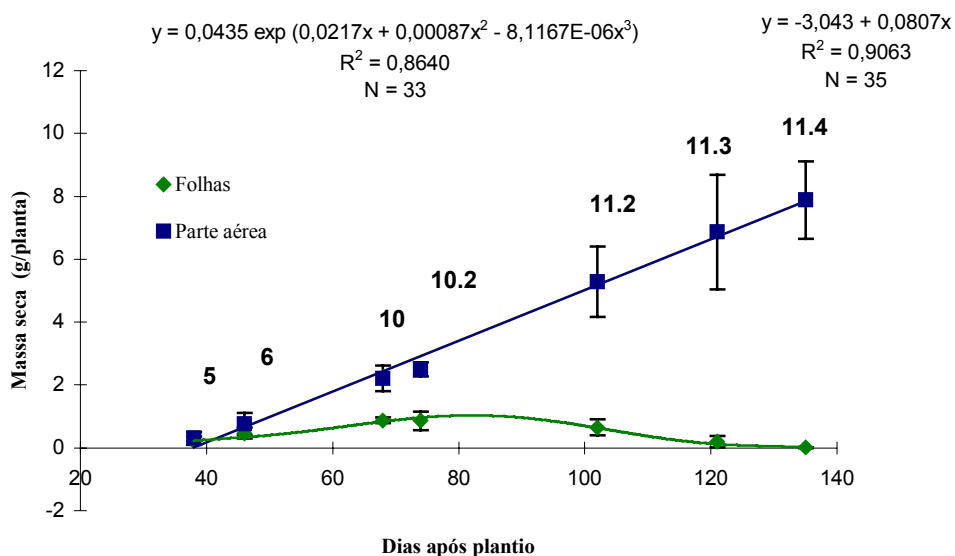


FIG. 4.11 - Massas secas médias de folhas verdes (g/planta) e da parte aérea por planta (g/planta) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.2.5. ÁREA FOLIAR E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

Os dados de área foliar por planta, nas sete datas de amostragem, ao longo do ciclo do desenvolvimento do trigo, estão apresentados na Fig. 4.12. Foi observado um crescimento em área foliar por planta na fase inicial do período experimental, até atingir o máximo observado no emborrachamento - estágio 10 (Tabela 4.1), aos 68 DAP, com $252,24\text{cm}^2/\text{planta}$, e, depois, foi observado um decréscimo até a maturação final. Esse comportamento foi similar às massas fresca e seca de folhas verdes por planta e ao número de folhas por planta, indicando que o aumento em peso seco e fresco das folhas foi associado diretamente ao aumento em área foliar e ao aumento de número de folhas por planta. As variações de área foliar e número de folhas no período compreendido pelo perfilhamento (5), aos 38 DAP, e o emborrachamento (10), aos 68 DAP, mostraram crescimento em área foliar por planta de 274%, aproximadamente, enquanto que o crescimento em número de folhas por planta foi de 46%, mostrando que os aumentos de massas fresca e seca de folhas e de área foliar deveram-se mais ao aumento de área por folha, do que ao aumento do número de folhas por planta. A equação de regressão escolhida para a variável área foliar por planta em função de DAP foi a exponencial quadrática, com coeficiente de determinação bom ($R^2 = 0,8828$), nos limites de 38 a 135 DAP.

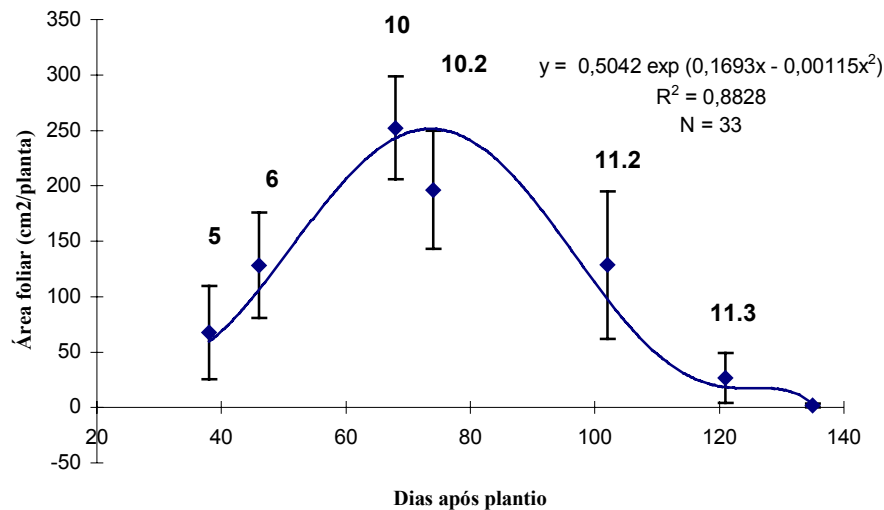


FIG. 4.12 - Área foliar média por planta (cm²/planta) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

Os dados de índice de área foliar (IAF), nas sete datas de amostragem, ao longo do ciclo do desenvolvimento do trigo, estão apresentados na Fig. 4.13. Foi observado um crescimento desde o início do período experimental até o máximo, obtido em meados da metade do ciclo de desenvolvimento, e, depois, decréscimo até a maturação final. Esse comportamento está de acordo com o observado por AASE (1978), FORMAGGIO (1989) e VALERIANO (1992). O comportamento de IAF, neste estudo, foi quase similar ao da área foliar, com pequena diferença, cerca de 2%, observada com o IAF entre os estádios 10 e 10.2 (Tabela 4.1), com máximo de IAF ocorrendo no espigamento (10.2), com um quarto do processo de espigamento completo, aos 74 DAP, com 3,85cm²/cm², enquanto o máximo em área foliar por planta ocorreu no emborrachamento (10). Isso foi, possivelmente, devido à variação da densidade de plantas ao longo do tempo. O máximo de IAF corresponde à máxima atividade fotossintética, ocorrida no espigamento (10.2). Após esse período, o IAF decresceu devido à senescência das folhas, embora a atividade fotossintética e a

produção de biomassa fresca continuasse um pouco mais, até o início da fase de maturação da cultura (11.2), comparando com a Fig. 4.6. A equação de regressão escolhida para a variável índice de área foliar em função de DAP foi a exponencial quadrática, com coeficiente de determinação ótimo ($R^2 = 0,9134$), nos limites de 38 a 135 DAP.

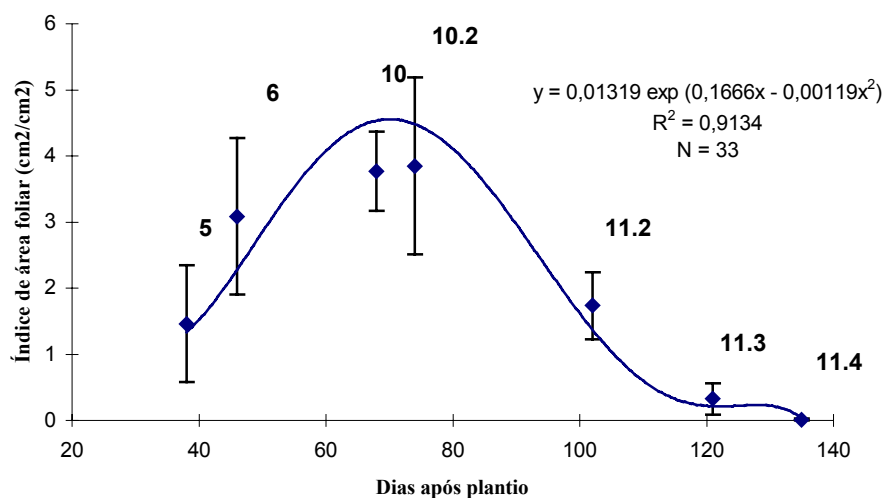


FIG. 4.13 - Índice de área foliar médio (cm²/cm²) de trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

4.3. DADOS DE RADIOMETRIA DE CAMPO

Sete campanhas foram realizadas no período de desenvolvimento do trigo para a caracterização espectral da cultura no campo. As campanhas iniciaram em 23 de maio de 1995, 38 dias após o plantio (DAP), no estágio do perfilhamento, e foram encerradas em 28 de agosto de 1995, aos 135 DAP, na maturação final, no ponto de colheita (Tabela 4.1).

Na Fig. 4.14 são apresentados os espectros de fator reflectância do trigo na faixa espectral de 400 a 1.100nm ao longo do ciclo de crescimento da cultura. No Anexo E são apresentados separadamente os espectros obtidos nas datas de campanha e os dados de fator de reflectância, padronizados conforme BOWKER et al. (1985) para várias culturas, inclusive de alguns estádios do trigo. A evolução sazonal do espectro de fator de reflectância (Fig. 4.14), está em boa concordância com os dados obtidos por LEAMER et al. (1980), AHLRICHS & BAUER (1983), BOWKER et al. (1985), HINZMAN et al. (1986) e BARET et al. (1987). Nos estádios intermediários de crescimento do trigo, seu comportamento espectral foi típico de uma vegetação sadia, com baixa reflectância nos comprimentos de onda visíveis e crescimento notável da reflectância na região do infravermelho próximo, como observam HOFFER (1978), MYERS (1983) e GUYOT (1988).

A Fig. 4.14 mostra também que a reflectância medida na faixa do infravermelho próximo (acima de 725nm), utilizada geralmente como indicativo da atividade biológica das plantas, apresentou tendência crescente à medida que a porção verde das plantas aumentava, com o desenvolvimento da cultura. A máxima reflectância na porção do infravermelho próximo foi observada no início do processo de espigamento (estádio 10.2), aos 74 DAP. Posteriormente, os valores de fator de reflectância decresceram com o avanço no processo de formação das espigas, florescimento e maturação da cultura. Durante a senescência, o fator de reflectância do dossel aumentou no visível e decresceu no infravermelho próximo, provocado pelo amarelecimento da planta.

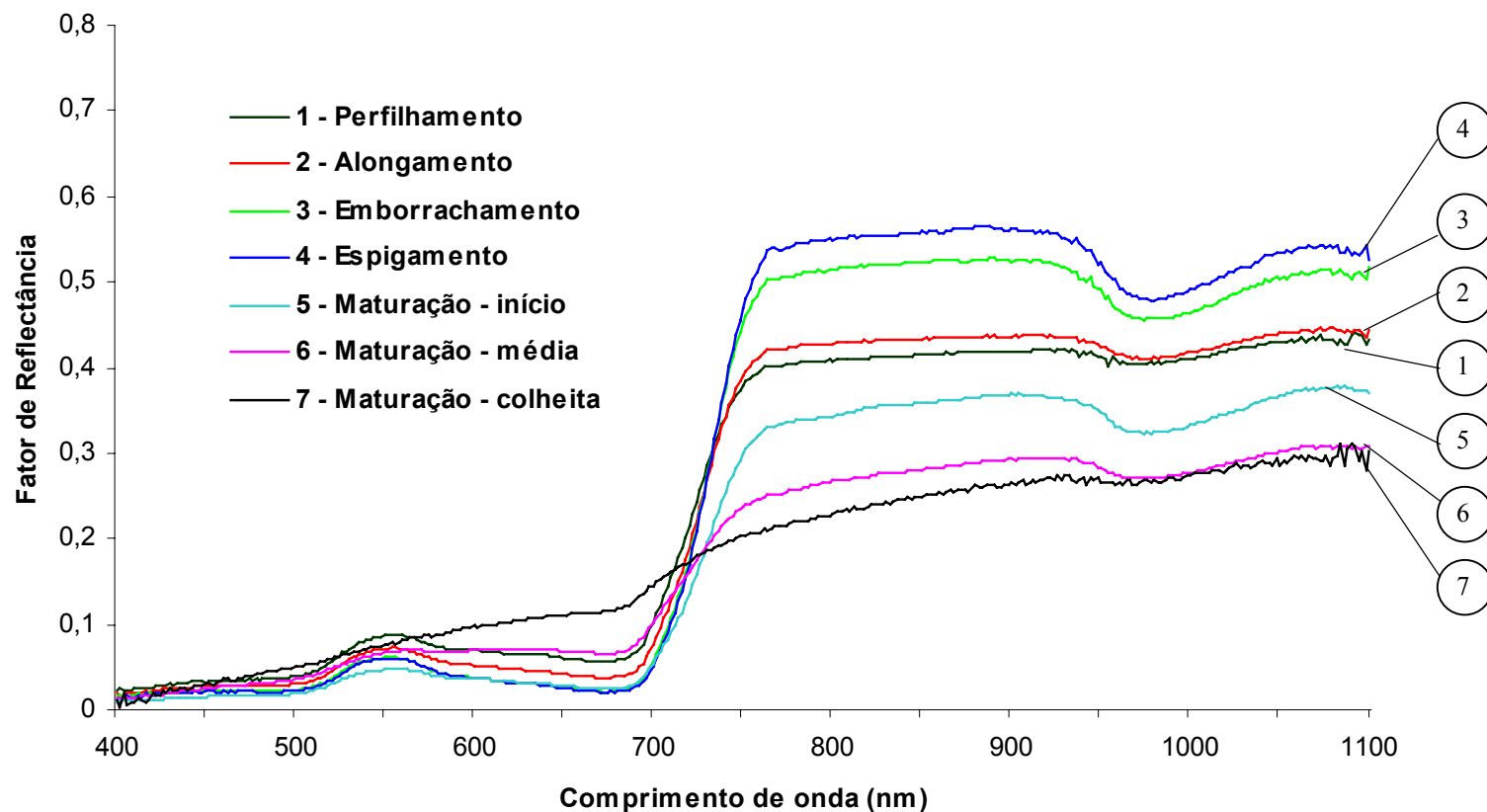


FIG. 4.14. – Espectros de fator de reflectância do trigo, cv. IAC-24 - Tucuruí, na estação de crescimento de 1995, ao longo do ciclo de desenvolvimento: 1) Perfilhamento - estágio fenológico 5 da escala de Feekes (38 dias após o plantio - DAP); 2) Alongamento - estágio 6 (46 DAP); 3) Emborrachamento - estágio 10 (68 DAP); 4) Espigamento - estágio 10.2 (74 DAP); 5) Maturação - início - estágio 11.2 (102 DAP); 6) Maturação - média - estágio 11.3 (121 DAP); 7) Maturação - colheita - estágio 11.4 (135 DAP).

No cálculo do fator de reflectância do dossel, foi utilizado como painel de referência a placa de sulfato de bário (BaSO_4), cujo espectro e dados tabulados são apresentados no Anexo F.

Foram calculados os fatores de reflectância nas bandas espectrais do NOAA, a partir dos valores médios de fator de reflectância obtidos integrando os espectros da Fig. 4.14 entre os comprimentos de onda de 580 a 680nm e 725 a 1.100nm, respectivamente dos canais 1 e 2. Os resultados estão apresentados nas Tabelas G.1 e G.2, do Anexo G. O fator de reflectância nos canais 1 e 2 do NOAA ao longo do período experimental é apresentado na Fig. 4.15.

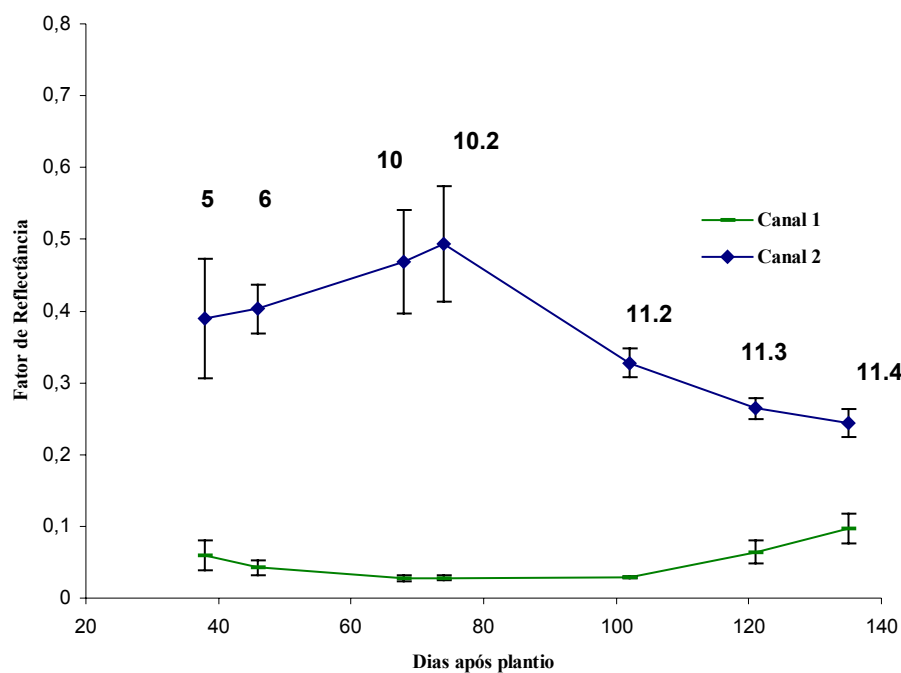


FIG. 4.15. - Fator de reflectância nos canais 1 e 2 do NOAA-AVHRR do trigo cv. IAC-24 - Tucuui, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1\text{DP}$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

Os espectros de reflectância dos canais 1 e 2, representando as bandas de comprimento de onda do visível e do infravermelho próximo, respectivamente,

tiveram comportamento típico de vegetação, semelhante ao apresentado por HINZMAN et al. (1986), utilizando as bandas do vermelho e do infravermelho próximo do satélite Landsat/TM.

O fator de reflectância média no canal 2 aumentou a partir do perfilhamento (5), aos 38 DAP, até o início do espigamento (10.2), aos 74 DAP, quando atingiu o valor máximo de 49,40%. Posteriormente, o fator de reflectância decaiu até o mínimo de 24,42%, ocorrido no estágio de maturação de colheita (11.4), aos 135 DAP. A queda da reflectância no infravermelho próximo foi mais acentuada a partir do início do espigamento - 10.2 ao início da maturação (11.2), ocorrido aos 102 DAP.

O comportamento do fator de reflectância no canal 1 foi o inverso do observado para o canal 2, com o valor mínimo de 2,80%, ocorrido no estágio de início do espigamento (10.2) e o máximo de 9,74% no ponto de colheita (11.4). Destaque-se também a diferença de amplitude dos espectros dos canais 1 e 2, comprovando que a vegetação é mais sensível no comprimento de onda do infravermelho próximo, comparado ao visível.

Além das bandas espectrais individuais, foram utilizados os índices de vegetação *RATIO*, *NDVI* e *TVI*, calculados a partir dos canais 1 e 2, a fim de caracterizar os estádios de crescimento. Os resultados estão apresentados nas Tabelas G.3, G.4 e G.5, do Anexo G. Os índices ao longo do ciclo de crescimento da cultura são apresentados na Fig. 4.16.

Os três índices de vegetação espectral tiveram comportamentos semelhantes quanto aos valores máximos e mínimos que ocorreram todos no estágio de início do espigamento (10.2), aos 74 DAP e na maturação de colheita (11.4), aos 135 DAP, respectivamente. Isso também ocorreu no canal 2.

Comparando os três índices de vegetação da Fig. 4.16, pode-se observar que as suas amplitudes de valores são muito diferentes, com a maior amplitude ocorrendo no *RATIO*, seguidos do *NDVI* e por último o *TVI*, o que é esperado pelas próprias definições desses índices.

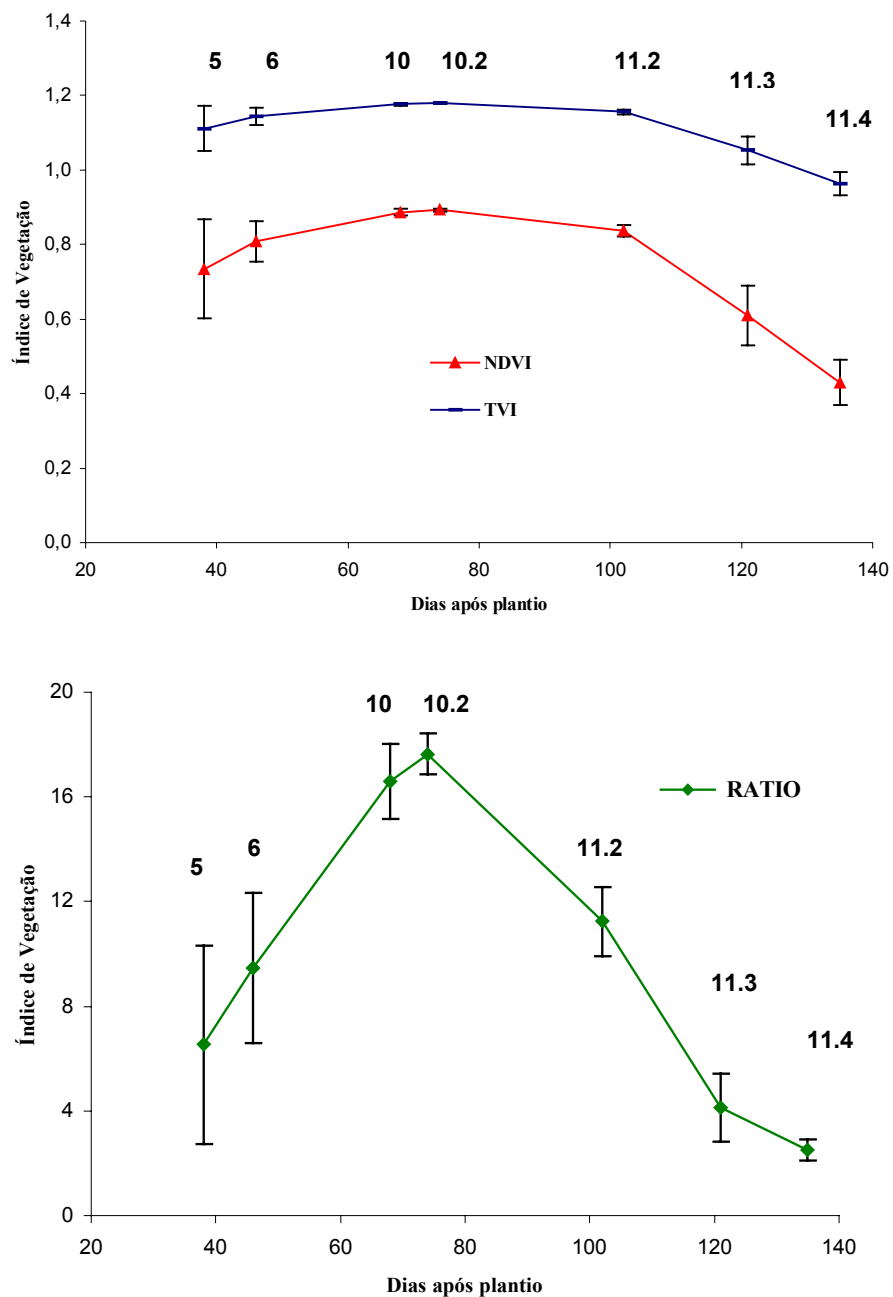


FIG. 4.16. - Índices de vegetação NDVI, TVI e RATIO utilizando os canais 1 e 2 do NOAA-AVHRR do trigo cv. IAC-24 - Tucuruí, durante todo o período experimental. As barras verticais representam $\pm 1DP$ (Desvio Padrão) em relação à média. Números na figura indicam o estágio de desenvolvimento.

O NDVI é o índice de vegetação mais comumente utilizado com os dados do NOAA-AVHRR. No comportamento sazonal do NDVI da cultura, foi observado que a partir do perfilhamento ocorreu um rápido desenvolvimento vegetativo até o ponto máximo no início do espigamento (10.2), no valor de 0,89, seguida de pequena redução até a maturação média (11.2) e, depois, nos estádios de florescimento e maturação ocorreu uma redução mais acentuada no NDVI, até a maturação final (11.4), no valor de 0,43. Esse comportamento é semelhante ao observado por QUARMBY et al. (1993), indicando que os estádios de crescimento inicial e de maturação seriam, desta forma, os mais críticos para a estimativa da produtividade.

O TVI foi menos sensível (menor amplitude de valores) que o NDVI, principalmente nos estádios iniciais de crescimento, entre o perfilhamento (5) e início do alongamento (6) e no estádio de maturação, entre o início da maturação (11.2) e a maturação final (11.4). Nos estádios intermediários, TVI e NDVI tiveram comportamentos muito semelhantes. O valor máximo de TVI foi de 1,18, alcançado no início do espigamento (10.2) e valor mínimo de 0,96, na maturação final (11.4).

O RATIO foi mais sensível que o NDVI em todo o ciclo de crescimento da cultura. O valor máximo foi de 17,64, no início do espigamento (10.2) e valor mínimo de 2,51 na maturação final. Esse comportamento foi em parte diferente de GUPTA (1993), pois esse autor observou que entre os estádios de alongamento à maturação de grãos leitosos e duros, a taxa de crescimento do RATIO e do NDVI foi semelhante, o que não foi observado neste estudo.

4.4. RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS E ESPECTRAIS DE CAMPO

Na Tabela 4.2 são apresentados os coeficientes de correlação simples entre as variáveis biofísicas e espectrais obtidos da radiometria de campo nos diferentes estádios de crescimento da cultura, de forma a avaliar a possibilidade de se estimar variáveis biofísicas a partir de dados espectrais do NOAA e a possível dependência do estágio fenológico da cultura.

As correlações significativas estatisticamente foram observadas nas datas referentes aos estádios de emborrachamento (10), aos 68 DAP, início do espigamento (10.2), aos 74 DAP e início e meio da maturação (11.2 e 11.3), aos 102 e 121 DAP, respectivamente. Nos estádios iniciais de crescimento, no perfilhamento (5), aos 38 DAP, início do alongamento (6), aos 46 DAP e na maturação final (11.4), aos 135 DAP, não foram observadas correlações entre as variáveis biofísicas e espectrais.

No estágio de emborrachamento (10), ocorreu uma única correlação significativa entre o canal 2 e a massa fresca total por área (MFT/M2).

No início do estágio de espigamento (10.2), três variáveis biofísicas tiveram correlação significativa com as variáveis espectrais. O número de folhas por planta (NFOLHAS) e a massa seca total por m^2 (MST/M2) tiveram correlação significativa com os canais 1 e 2. A massa fresca total por m^2 (MFT/M2) foi correlacionada de forma significativa com todas as variáveis espectrais.

No início do estágio de maturação (11.2), sete variáveis biofísicas foram correlacionadas significativamente, sendo que dessas, cinco variáveis: número de folhas por planta (NFOLHAS), a massa fresca total por planta (MFT/P), as massas fresca e seca de folhas verdes por planta (MFF/P e MSF/P) e a área foliar por planta (AF) foram correlacionadas significativamente com os três índices de vegetação (RATIO, NDVI e TVI). A massa seca total por m^2 teve correlação significativa somente com o canal 2. O índice de área foliar (IAF) teve correlação significativa com o canal 2 e os três índices espectrais.

Na maturação média (11.3), excetuando-se as variáveis altura da planta (ALTURA) e massa seca total por planta (MST/P) que não tiveram correlação significativa com nenhuma das variáveis espectrais, as restantes nove variáveis biofísicas foram correlacionadas significativamente com alguma variável espectral. As variáveis número de plantas por m^2 (NPLANTAS), número de folhas verdes por planta (NFOLHAS), massa fresca e seca de folhas por planta (MFF/P e MSF/P), área foliar por planta (AF) e índice de área foliar (IAF) tiveram correlação significativa com o canal 1 e os três índices. Para a massa fresca total por m^2 (MFT/M2) foi significativo somente com o canal 1 e para as variáveis massas fresca e seca total por planta (MFT/P e MST/P) significativos somente com o canal 2.

A relação entre as variáveis biofísicas e espectrais foi influenciada pelo estágio de desenvolvimento da cultura, estando de acordo com AHLRICHS & BAUER (1983) e BARET et al. (1987).

As melhores correlações estatísticas entre as variáveis biofísicas e espectrais foram observadas entre o espigamento e a maturação média. TUCKER et al. (1980) observaram que as melhores correlações ocorreram nos estádios anteriores, entre o alongamento e o florescimento e AHLRICHS & BAUER (1983) encontraram nos estádios entre o perfilhamento e o florescimento, ambos utilizando as bandas do Landsat.

De uma forma geral, as variáveis espectrais e biofísicas foram pouco ou nada correlacionadas no início e no final do ciclo de crescimento do trigo, estando de acordo com TUCKER et al. (1980). Antes do início do espigamento (10.2), a evolução da reflectância foi provavelmente influenciada pela fração de área do solo, com restos de palhada da cultura anterior, no campo de visada do radiômetro. Esse comportamento também foi observado por BARET et al. (1987).

TABELA 4.2 - Coeficientes de correlação linear simples (R) entre variáveis biofísicas e espectrais do trigo nas datas de campanha

	Canal 1	Canal 2	RATIO	NDVI	TVI
1) 38 DAP - Perfilhamento - Estádio fenológico 5					
ALTURA	-	-	-	-	-
NPLANTAS	-0,1235	0,0582	-0,0991	0,1487	0,1594
NFOLHAS	0,5987	-0,1840	-0,4466	-0,4795	-0,4831
MFT/M2	0,5576	-0,1053	-0,4629	-0,4100	-0,4100
MFT/P	0,5752	-0,1332	-0,4471	-0,4393	-0,4412
MFF/P	0,4131	0,1040	-0,1809	-0,2460	-0,2519
MST/M2	0,3014	0,1935	-0,2256	-0,1264	-0,1243
MST/P	0,5834	-0,1562	-0,4558	-0,4532	-0,4555
MSF/P	0,5773	-0,1492	-0,4549	-0,4453	-0,4474
AF	0,5603	-0,1133	-0,4333	-0,4218	-0,4236
IAF	0,4535	0,0225	-0,3776	-0,2899	-0,2883
2) 46 DAP -Alongamento - Estádio fenológico 6					
ALTURA	0,0725	0,1588	0,0120	0,0082	0,0076
NPLANTAS	0,4374	-0,0276	-0,3908	-0,3529	-0,3516
NFOLHAS	-0,5429	0,3770	0,5157	0,5328	0,5332
MFT/M2	0,1173	0,1289	-0,0656	-0,0362	-0,0355
MFT/P	-0,3666	0,3322	0,3712	0,3892	0,3895
MFF/P	-0,3705	0,3501	0,3786	0,3969	0,3972
MST/M2	0,0356	0,1908	0,0166	0,0433	0,0438
MST/P	-0,4078	0,3560	0,4144	0,4270	0,4271
MSF/P	-0,4211	0,4032	0,4311	0,4490	0,4493
AF	-0,3452	0,3462	0,3585	0,3767	0,3770
IAF	-0,0611	0,3456	0,1078	0,1526	0,1538
3) 68 DAP - Emborrachamento - Estádio fenológico 10					
ALTURA	0,2263	0,3328	0,2986	0,2904	0,2900
NPLANTAS	0,5191	0,7102	0,3892	0,3950	0,3949
NFOLHAS	-0,3684	-0,5198	-0,3868	-0,3805	-0,3800
MFT/M2	0,8321	(*) 0,9404	0,3557	0,3511	0,3505
MFT/P	-0,1708	-0,0249	0,3090	0,2969	0,2966
MFF/P	-0,1424	-0,2479	-0,2430	-0,2415	-0,2413
MST/M2	0,6622	0,6960	0,2207	0,2140	0,2133
MST/P	-0,1314	-0,0056	0,2967	0,2839	0,2835
MSF/P	-0,5374	-0,5812	-0,1802	-0,1800	-0,1796
AF	-0,1467	-0,2444	-0,2166	-0,2171	-0,2169
IAF	0,4327	0,6430	0,3749	0,3829	0,3829

TABELA 4.2 - Continuação

	Canal 1	Canal 2	RATIO	NDVI	TVI
4) 74 DAP - Espigamento - Estádio fenológico 10.2					
ALTURA	-0,7567	-0,7569	-0,6918	-0,6940	-0,6945
NPLANTAS	-0,8106	-0,7533	-0,4863	-0,4617	-0,4611
NFOLHAS	(*) 0,8906	(*) 0,8936	0,8073	0,7996	0,7997
MFT/M2	(**) -0,9813	(**) -0,9908	(*) -0,9372	(*) -0,9313	(*) -0,9312
MFT/P	0,7065	0,6936	0,5442	0,5242	0,5240
MFF/P	0,8160	0,8078	0,6791	0,6660	0,6661
MST/M2	(*) -0,9076	(*) -0,9111	-0,8282	-0,8213	-0,8215
MST/P	0,6935	0,6723	0,4990	0,4711	0,4704
MSF/P	0,8335	0,8266	0,7013	0,6883	0,6884
AF	0,7240	0,7322	0,6778	0,6758	0,6762
IAF	0,0059	0,0590	0,2149	0,2298	0,2307
5) 102 DAP - Maturação - início - Estádio fenológico 11.2					
ALTURA	0,6730	-0,8405	-0,8471	-0,8629	-0,8633
NPLANTAS	0,6491	-0,3043	-0,5607	-0,5211	-0,5201
NFOLHAS	-0,7791	0,7794	(*) 0,8877	(*) 0,8815	(*) 0,8813
MFT/M2	-0,7917	0,3705	0,6715	0,6441	0,6436
MFT/P	-0,7418	0,8743	(*) 0,9121	(*) 0,9201	(*) 0,9202
MFF/P	-0,8782	0,7690	(*) 0,9420	(*) 0,9299	(*) 0,9295
MST/M2	0,1234	(*) -0,8998	-0,5449	-0,6104	-0,6119
MST/P	-0,4728	-0,1198	0,2304	0,1705	0,1691
MSF/P	-0,8508	0,7654	(*) 0,9232	(*) 0,9124	(*) 0,9120
AF	-0,8332	0,8009	(*) 0,9305	(*) 0,9246	(*) 0,9244
IAF	-0,6688	(**) 0,9594	(*) 0,9095	(*) 0,9351	(*) 0,9357
6) 121 DAP - Maturação - médio - Estádio fenológico 11.3					
ALTURA	-0,4045	-0,1487	0,4988	0,4098	0,4018
NPLANTAS	(*) -0,9809	-0,1580	(**) 0,9985	(**) 0,9930	(**) 0,9920
NFOLHAS	(*) -0,9649	-0,0637	(**) 0,9968	(**) 0,9995	(**) 0,9993
MFT/M2	(*) -0,9724	-0,5303	0,8939	0,8848	0,8833
MFT/P	-0,5646	(*) -0,9593	0,3797	0,3456	0,3420
MFF/P	(*) -0,9810	-0,1406	(**) 0,9981	(**) 0,9967	(**) 0,9961
MST/M2	-0,5513	(*) -0,9594	0,3708	0,3327	0,3287
MST/P	0,1886	-0,8415	-0,3565	-0,4113	-0,4163
MSF/P	(*) -0,9672	-0,1113	(**) 0,9997	(**) 0,9918	(**) 0,9906
AF	(*) -0,9786	-0,1191	(**) 0,9876	(**) 0,9972	(**) 0,9975
IAF	(*) -0,9771	-0,1256	(**) 0,9991	(**) 0,9969	(**) 0,9962

TABELA 4.2 - Continuação

	Canal 1	Canal 2	RATIO	NDVI	TVI
7) 135 DAP - Maturação - colheita - Estádio fenológico 11.4					
ALTURA	-0,4031	-0,3591	0,3727	0,3996	0,4031
NPLANTAS	0,5538	0,6184	-0,4877	-0,5042	-0,5060
NFOLHAS	-0,5811	-0,4073	0,7140	0,6914	0,6878
MFT/M2	0,3157	0,5021	-0,1112	-0,1629	-0,1700
MFT/P	-0,4087	-0,4562	0,4147	0,4014	0,3987
MFF/P	-0,4316	-0,2629	0,6174	0,5698	0,5625
MST/M2	0,6975	0,7912	-0,5950	-0,6199	-0,6229
MST/P	0,0109	-0,0387	0,0286	0,0009	-0,0037
MSF/P	-0,5000	-0,3253	0,6695	0,6306	0,6245
AF	-0,4841	-0,3083	0,6528	0,6146	0,6087
IAF	-0,3635	-0,1855	0,5312	0,4950	0,4894

(*) Nível de significância de 5%

ALTURA - altura da planta (cm)

NPLANTAS - número de plantas/m²

NFOLHAS - número de folhas verdes por planta

MFT/M² - massa fresca total da planta (g/m²)

MFT/P - massa fresca total da planta (g/planta)

MFF/P - massa fresca de folhas verdes (g/planta)

(**) Nível de significância de 1%

MST/P - massa seca total da planta (g/m²)

MST/P - massa seca total da planta (g/m²)

MSF/P - massa seca de folhas verdes (g/planta)

AF - área foliar (cm²/planta)

IAF - índice de área foliar (cm²/cm²)

Não houve diferença de comportamento entre os índices de vegetação, sendo altamente correlacionados entre si, não permitindo a definição do melhor índice.

Foram selecionadas duas das variáveis biofísicas, massa fresca de folhas verdes por planta (MFF/P) e índice de área foliar (IAF) com relação à variável espectral NDVI, como exemplo da variação do coeficiente de determinação (R^2) ao longo do ciclo de crescimento da cultura, representado pelas fases fenológicas. Esses dados foram obtidos da Tabela 4.2 e são apresentados na Figura 4.17.

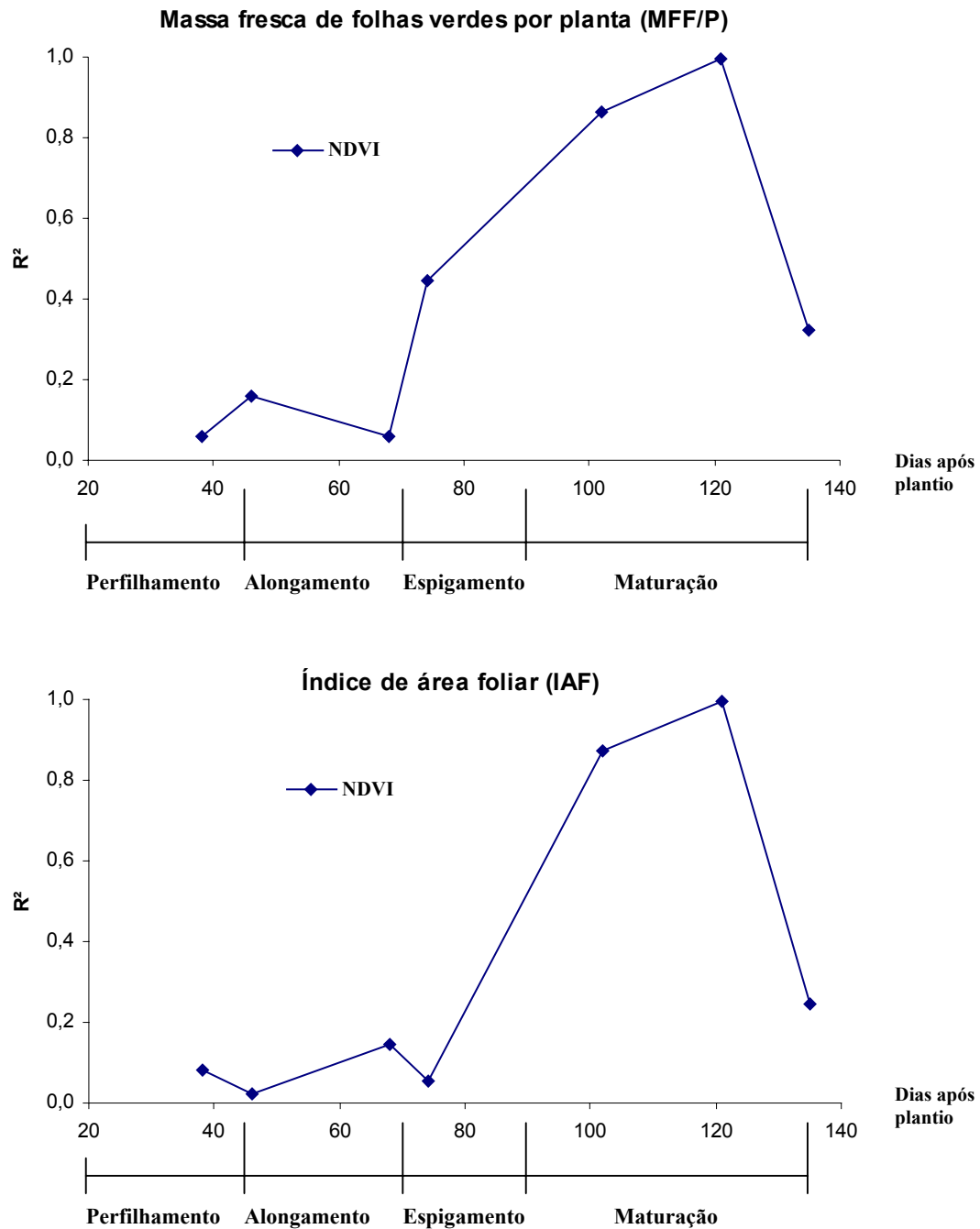


FIG. 4.17. - Coeficientes de determinação (R^2) das variáveis biofísicas massa fresca de folhas verdes por planta e índice de área foliar com relação ao NDVI ao longo do estágio fenológico da cultura.

4.5. DADOS NOAA-AVHRR

Das seis imagens pré-selecionadas do NOAA, foi possível utilizar quatro cenas de boa qualidade, isto é, sem nuvens, nas datas apresentadas na Tabela 4.3. Com quatro datas e dois canais espectrais por data, foram totalizadas oito imagens.

TABELA 4.3 – Passagens selecionadas do satélite NOAA-14

Data	Dias decorridos no ano (DDA)	Dias após plantio (DAP)	Elevação (graus)	Horário (GMT*)
23/05	143	38	87,7	16:58
28/06	179	74	64,7	17:12
26/07	207	102	66,7	17:12
14/08	226	121	74,6	17:09

* GMT (*Greenwich Mean Time*)

Na Tabela 4.4 são apresentados os dados de entrada do sistema computacional SCORADIS, de correção atmosférica, segundo o modelo 5S. Esses dados foram obtidos segundo a metodologia adotada por ZULLO (1994). Os dados de radiação solar direta obtidos na radiometria de campo são apresentados no Anexo H. Por problemas com o cabo de fibra ótica do espectroradiômetro em duas datas, os dados de radiação solar direta do dia 23 de maio (38DAP) foram utilizados também para o dia 28 de junho (74 DAP) e os dados de 26 de julho (102 DAP) para o 14 de agosto (121 DAP).

Foi obtido o valor do fator de reflectância do pixel da área de estudo nos canais 1 e 2 das imagens e calculados os índices de vegetação espectrais RATIO, NDVI e TVI. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.5 e nas Figs. 4.18 a 4.22.

TABELA 4.4 – Quantidades de vapor d’água e de ozônio e espessura ótica dos aerossóis, dados de entrada para a correção atmosférica

Data	Conteúdo de vapor de H₂O (g/cm²)	Conteúdo de O₃ (cm.atm)	Espessura ótica dos aerossóis a 550nm
23/05 (38 DAP)	1,6397	0,29	0,2490
28/06 (74 DAP)	1,5168	0,30	0,2222
26/07 (102 DAP)	1,8243	0,30	0,3244
14/08 (121 DAP)	2,0038	0,31	0,3611

TABELA 4.5 – Dados espectrais obtidos da radiometria de campo e do satélite NOAA-AVHRR

Variáveis	Datas			
Espectrais	23/05 (38 DAP)	28/06 (74 DAP)	26/07 (102 DAP)	14/08 (121 DAP)
Canal 1 – campo^(*)	0,05961	0,02801	0,02915	0,06408
Canal 2 – orbital	0,05490	0,03922	0,04706	0,05098
Canal 2 – campo^(*)	0,38969	0,49403	0,32757	0,26431
Canal 2 – orbital	0,25098	0,23137	0,23137	0,20784
NDVI – campo^(*)	0,73464	0,89271	0,83656	0,60973
NDVI – orbital	0,64103	0,71014	0,66197	0,60606
TVI – campo^(*)	1,11114	1,18013	1,15610	1,05344
TVI – orbital	1,06819	1,10007	1,07795	1,05117
RATIO – campo^(*)	6,53691	17,64022	11,23676	4,12461
RATIO - orbital	4,57143	5,90000	4,91667	4,07692

^(*) Média das cinco parcelas

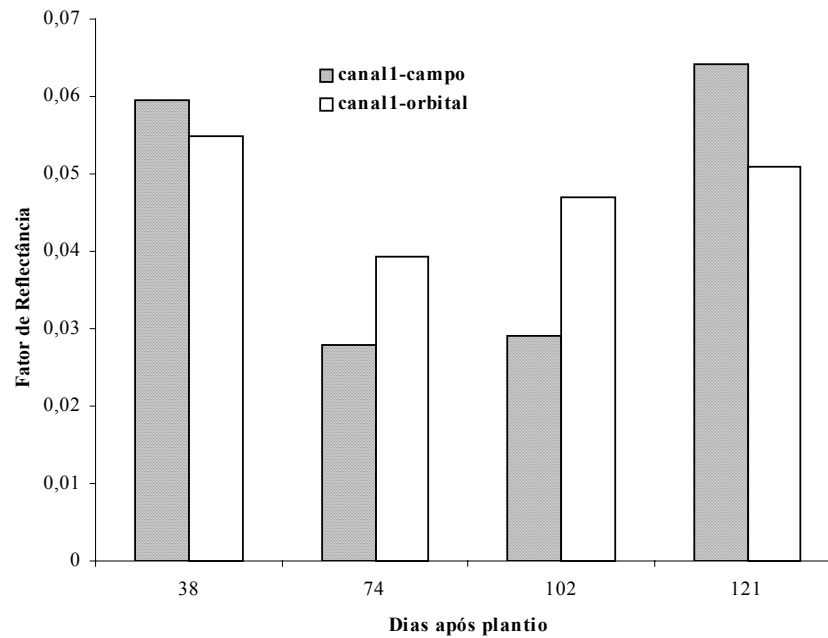


FIG. 4.18. - Fator de reflectância no canal 1 do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.

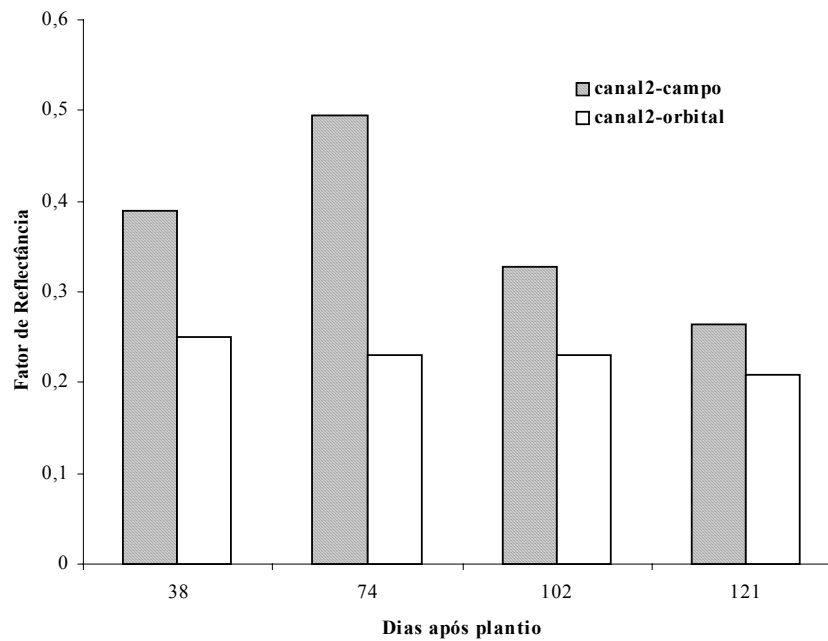


FIG. 4.19. - Fator de reflectância no canal 2 do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.

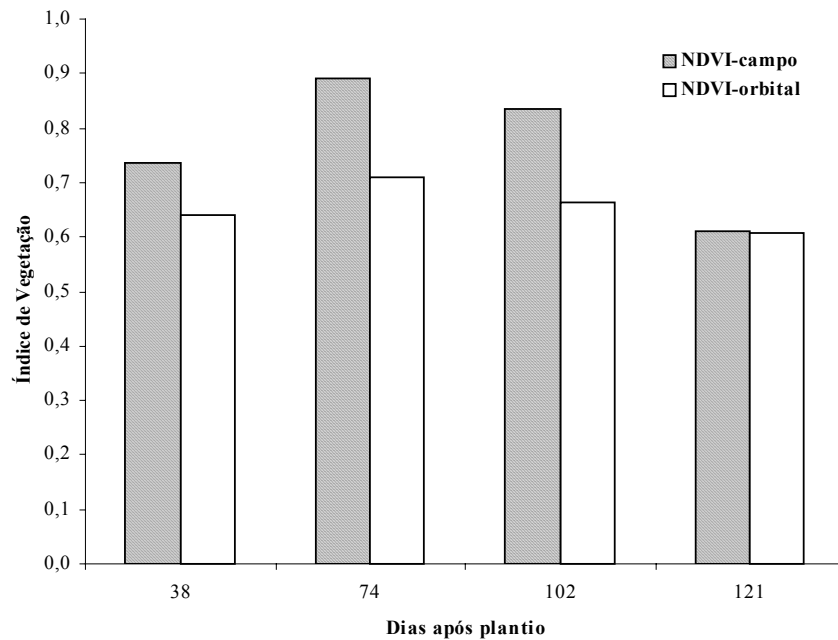


FIG. 4.20. - Índice de vegetação NDVI do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.

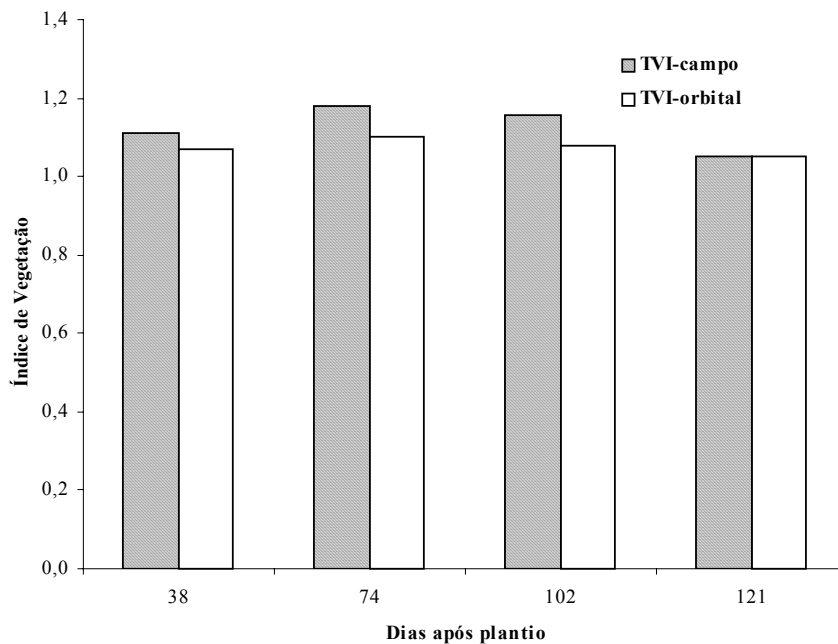


FIG. 4.21. - Índice de vegetação TVI do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.

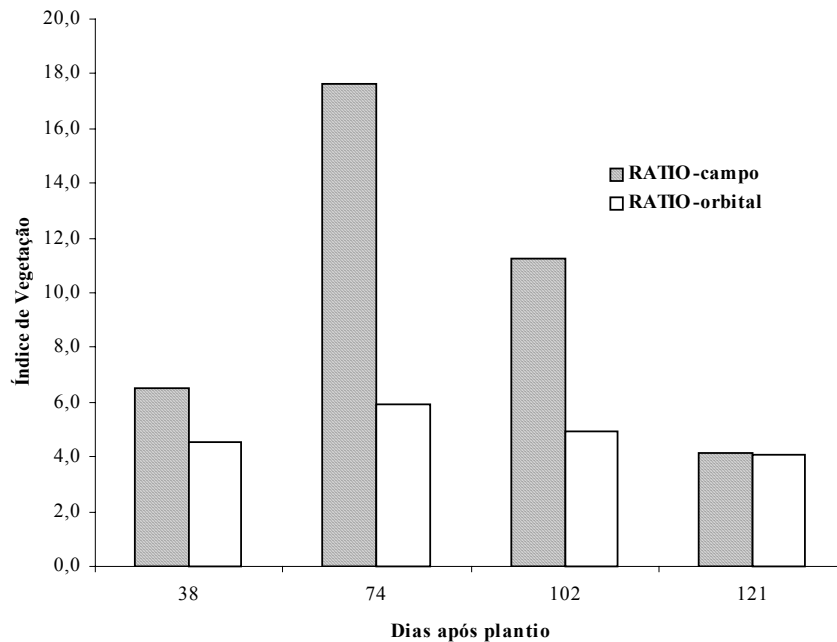


FIG. 4.22. - Índice de vegetação RATIO do NOAA-AVHRR, obtida por radiometria de campo e a partir da imagem orbital.

Os dados orbitais foram em geral sempre menores que os dados de campo. Somente nas datas 74 DAP e 102 DAP, no canal 1 (Fig. 4.18), os dados orbitais foram maiores que os de campo. Porém, como a amplitude do valor de fator de reflectância do visível é pequena comparada ao do canal 2 (Fig. 4.19), do infravermelho próximo, os índices de vegetação obtidos tiveram sempre dados orbitais inferiores aos de campo. As diferenças entre os dados orbitais e os de campo nos canais 1 e 2 não foram proporcionais nas quatro datas de campanha.

Considerando os índices de vegetação (Figs. 4.20, 4.21 e 4.22), embora as diferenças não sejam também proporcionais para as quatro datas, a menor diferença para os três índices ocorreu aos 121 DAP, na maturação média (11.3) e as maiores diferenças ocorreram aos 74 DAP, no início do espigamento e aos 102 DAP, no início da maturação (11.2). A menor diferença entre os dados orbitais e de campo foi obtida no TVI, com 4,5% de diferença, média das quatro datas. Seguiu-se o NDVI, com 13,7% e, por último, o RATIO, com 38,5%.

O NDVI e o TVI tiveram comportamento similares entre si. O RATIO obtido do campo teve uma amplitude muito maior que o obtido do satélite.

Os efeitos atmosféricos, mesmo para um dia sem nuvens, reduzem o contraste entre a vegetação do visível e do infravermelho próximo, portanto, geralmente reduzindo os índices de vegetação (RONDEAUX, 1995). A correção atmosférica visa diminuir esses efeitos. No entanto, ao ser utilizado o modelo 5S de correção atmosférica, observou-se que erros mínimos nas estimativas do vapor d'água e de ozônio e da espessura ótica dos aerossóis produzem um erro relativamente significativo, tanto nos valores de fator de reflectância dos canais 1 e 2, como nos índices de vegetação calculados a partir deles.

Outras questões também podem ser levantadas associadas ao uso de dados de sensor de satélite com baixa resolução espacial no monitoramento da cultura. A escolha da área de estudo de terreno homogêneo e grande cultura foi feita a fim de evitar o problema de utilização de dados AVHRR de 1km de resolução, com grande área de terreno de cada pixel, comparada ao tamanho médio das áreas de culturas agrícolas, como citam QUARMBY et al. (1992 e 1993). No Anexo I, são apresentadas algumas fotografias ilustrativas da área de estudo em diferentes datas de campanha.

5. CONCLUSÕES

1. As informações sobre os atributos agronômicos do trigo podem ser inferidas de suas características espectrais. Os dados espectrais mostraram ser relacionados com o desenvolvimento fenológico da cultura, sendo mais evidente nos estádios entre o espigamento e a maturação final. Já no início do ciclo do crescimento, houve, possivelmente, influência da fração de área do terreno exposto (solo e restos da palhada) e no estágio de maturação final, o efeito foi ocasionado pela senescência da planta.

2. O comportamento espectral na faixa do comprimento de onda do infravermelho próximo demonstrou ser um bom indicador do desenvolvimento da cultura. A reflectância no infravermelho próximo apresentou tendência crescente à medida em que a porção verde das plantas aumentava, com o máximo valor observado no início do processo de espigamento, coincidindo com o máximo IAF ($3,85\text{cm}^2/\text{cm}^2$). Posteriormente, os valores de fator de reflectância decresceram com o avanço no processo de formação das espigas, florescimento e maturação da cultura.

3. O fator de reflectância média referente ao canal 2 do satélite NOAA-AVHRR e os índices de vegetação (RATIO, NDVI e TVI), derivados das informações espectrais dos canais 1 e 2, constituíram-se em bons indicadores do desenvolvimento da cultura. Eles tiveram comportamentos semelhantes, com valores máximos observados no início do espigamento (49,40% no canal 2; 17,64 de RATIO; 0,89 de NDVI e 1,18 de TVI), coincidindo com o máximo de IAF e valores mínimos na maturação de colheita.

4. Os dados orbitais foram, em geral, sempre menores que os dados espectrais obtidos da radiometria de campo. Essas diferenças podem ser resultantes dos efeitos atmosféricos, não totalmente eliminados pelo processo de correção atmosférica e também da dificuldade de se relacionar medidas de amostras de pequenas áreas de terreno com grandes áreas de um pixel NOAA-AVHRR.

5. Dos índices espectrais de vegetação, o TVI obtido dos dados orbitais foi o que obteve o melhor resultado, pois foi o menos afetado pelos efeitos atmosféricos, seguido do NDVI e do RATIO. A menor diferença entre os três índices ocorreu no estágio de maturação média e as maiores diferenças ocorreram no início do espigamento e início da maturação.

6. ANEXOS

ANEXO A – VARIÁVEIS BIOFÍSICAS

TABELA A.1 - Altura média da planta, em cm, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(cm)									(%)
143	38	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
151	46	44,7	38,0	36,7	28,0	20,3	33,54	9,49	28,30
173	68	67,3	66,7	54,0	53,0	47,0	57,60	8,99	15,61
179	74	84,0	79,7	68,3	63,0	60,0	71,00	10,45	14,72
207	102	94,7	94,7	93,0	88,3	87,3	91,60	3,56	3,88
226	121	90,7	93,0	92,7	94,0	96,3	93,34	2,04	2,19
240	135	94,3	92,0	85,0	91,7	92,3	91,06	3,54	3,88

DDA – Dias decorridos no ano

DAP – Dias após o plantio

sd - sem dados

DP – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação

TABELA A.2 - Número médio de plantas por m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(número de plantas/m ²)									(%)
143	38	238,00	183,30	236,70	293,30	165,00	223,26	50,73	22,72
151	46	260,00	285,00	165,00	260,00	261,70	246,34	46,69	18,95
173	68	171,70	140,00	196,70	140,00	115,00	152,68	31,78	20,82
179	74	188,30	200,00	273,30	160,00	118,30	187,98	57,15	30,40
207	102	165,00	136,70	203,30	130,00	103,30	147,66	38,07	25,78
226	121	141,70	125,00	125,00	198,30	80,00	134,00	42,64	31,82
240	135	101,70	83,30	125,00	63,30	76,70	90,00	23,96	26,62

TABELA A.3 - Número médio de folhas verdes por planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(número de folhas verdes/planta)									(%)
143	38	12,2	13,4	8,3	7,1	8,1	9,82	2,79	28,42
151	46	12,8	15,0	16,3	11,8	11,5	13,48	2,09	15,50
173	68	9,9	11,0	14,3	17,1	19,6	14,38	4,07	28,28
179	74	6,3	9,3	11,4	13,6	19,4	12,00	4,94	41,13
207	102	6,6	6,1	5,7	8,2	9,7	7,26	1,66	22,90
226	121	1,3	0,7	0,9	2,6	4,0	1,90	1,39	73,02
240	135	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3	0,12	0,13	108,65

TABELA A.4 - Massa fresca média da parte aérea da planta, em g/m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/m ²)									(%)
143	38	921,45	865,58	324,22	255,75	138,03	501,006	364,980	72,850
151	46	1219,30	1305,37	915,37	550,30	507,85	899,638	368,302	40,939
173	68	2332,90	2052,05	2239,90	1572,15	1811,57	2001,714	312,102	15,592
179	74	2765,43	2340,87	2590,20	2134,63	2001,17	2366,460	315,069	13,314
207	102	2093,92	2527,85	2457,10	2557,05	2810,62	2489,308	258,208	10,373
226	121	1846,53	1797,45	1482,90	2285,85	1912,12	1864,970	287,332	15,407
240	135	1447,22	1430,35	1445,68	1182,17	1426,87	1386,458	114,556	8,263

TABELA A.5 - Massa fresca média da parte aérea da planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/planta)									(%)
143	38	3,85	4,03	1,44	0,94	1,04	2,260	1,546	68,420
151	46	4,95	6,41	6,88	2,83	2,28	4,670	2,067	44,258
173	68	14,45	18,63	13,36	13,45	16,73	15,324	2,293	14,966
179	74	14,94	14,54	15,59	14,93	21,24	16,248	2,816	17,331
207	102	16,26	12,98	15,00	24,89	30,00	19,826	7,281	36,723
226	121	16,00	17,89	13,48	17,47	30,55	19,078	6,641	34,810
240	135	12,70	19,50	12,34	20,30	19,67	16,902	4,013	23,745

TABELA A.6 - Massa fresca média de folhas verdes por planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/planta)									(%)
143	38	2,15	2,24	0,84	0,61	sd	1,460	0,855	58,539
151	46	2,55	3,12	3,26	1,75	1,46	2,434	0,795	32,644
173	68	3,44	4,11	4,67	4,59	6,64	4,690	1,195	25,479
179	74	2,45	2,72	3,99	4,22	7,62	4,200	2,061	49,076
207	102	1,66	1,62	1,52	3,11	4,96	2,574	1,486	57,744
226	121	0,31	0,18	0,19	0,66	1,48	0,564	0,548	97,119
240	135	0,02	0,03	0,00	0,00	0,05	0,020	0,021	106,066

TABELA A.7 - Massa seca média da parte aérea da planta, em g/m², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/m ²)									(%)
143	38	123,50	72,08	27,94	23,19	11,66	51,674	46,236	89,477
151	46	188,30	204,65	151,60	88,38	72,73	141,132	58,802	41,664
173	68	223,53	188,62	179,16	138,61	139,98	173,980	35,719	20,531
179	74	442,45	396,45	373,20	334,72	264,88	362,340	67,008	18,493
207	102	595,70	756,78	601,05	549,78	586,07	617,876	80,184	12,977
226	121	684,12	770,03	586,98	749,95	619,77	682,170	79,486	11,652
240	135	736,98	693,23	788,70	513,17	591,60	664,736	111,489	16,772

TABELA A.8 - Massa seca média da parte aérea da planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/planta)									(%)
143	38	0,50	0,55	0,20	0,16	0,16	0,314	0,194	61,820
151	46	0,80	1,02	1,17	0,47	0,33	0,758	0,356	46,935
173	68	2,30	2,84	1,79	1,96	2,15	2,208	0,402	18,221
179	74	2,49	2,51	2,27	2,38	2,86	2,502	0,222	8,872
207	102	4,71	6,40	3,67	5,49	6,15	5,284	1,115	21,100
226	121	5,78	7,64	5,39	5,78	9,73	6,864	1,826	26,604
240	135	6,45	9,40	6,83	8,60	8,12	7,880	1,228	15,586

TABELA A.9 - Massa seca média de folhas verdes por planta, em g/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(g/planta)									(%)
143	38	0,35	0,38	0,14	0,12	0,11	0,220	0,133	60,559
151	46	0,48	0,62	0,65	0,33	0,25	0,466	0,175	37,618
173	68	0,76	0,88	0,83	0,91	1,00	0,876	0,090	10,229
179	74	0,60	0,66	0,82	0,87	1,35	0,860	0,296	34,366
207	102	0,50	0,49	0,45	0,77	1,06	0,654	0,260	39,764
226	121	0,10	0,06	0,07	0,25	0,51	0,198	0,190	96,185
240	135	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,008	0,008	104,583

TABELA A.10 - Área foliar média, em cm²/planta, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(cm ² /planta)									(%)
143	38	112,28	114,59	44,60	31,70	34,17	67,468	42,248	62,620
151	46	138,19	169,90	175,10	87,48	70,47	128,228	47,511	37,052
173	68	205,05	238,89	244,42	242,97	329,86	252,238	46,306	18,358
179	74	134,23	153,12	216,92	210,57	267,03	196,374	53,265	27,124
207	102	88,84	80,34	80,15	161,91	230,74	128,396	66,707	51,954
226	121	17,77	9,09	10,14	32,11	63,18	26,458	22,494	85,016
240	135	2,16	2,12	0,00	0,00	4,09	1,674	1,723	102,935

TABELA A.11 - Índice de área foliar médio, em cm²/cm², ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV
(cm ² /cm ²)									(%)
143	38	2,67	2,10	1,05	0,93	0,56	1,462	0,885	60,531
151	46	3,59	4,84	2,89	2,27	1,84	3,086	1,182	38,298
173	68	3,52	3,34	4,80	3,40	3,79	3,770	0,601	15,946
179	74	2,53	3,06	5,93	3,37	4,35	3,848	1,339	34,801
207	102	1,47	1,10	1,63	2,10	2,38	1,736	0,508	29,283
226	121	0,25	0,11	0,13	0,64	0,51	0,328	0,236	72,031
240	135	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,014	0,013	95,831

**ANEXO B – MODELOS DE AJUSTE E
EQUAÇÕES DAS VARIÁVEIS BIOFÍSICAS**

TABELA B.1 – Modelos de ajuste, equações e campo dos números reais em que as funções não são definidas ou pontos em que os ajustes não são realizados

Modelo	Equação	Ajuste não definido
Linear	$y = a + bx$	-
Exponencial	$y = a.exp(bx)$	$y \leq 0, a \leq 0$
Hiperbólica	$y = ax / (b + x)$	$y = 0, x = 0, x = -b$
Logística	$y = c / (1 + a.exp(-bx))$	$y = 0, y \geq c, a \leq 0$
Quadrática	$y = a + bx + cx^2$	-
Cúbica	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	-
Exponencial quadrática	$y = a.exp(bx + cx^2)$	$y \leq 0, a \leq 0$
Exponencial cúbica	$y = a.exp(bx + cx^2 + dx^3)$	$y \leq 0, a \leq 0$

FONTE: ZULLO & ARRUDA (1986)

TABELA B.2 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ALTURA (cm), em função de dias após plantio (DAP)

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,7832	13,82098	0,65057	-	-
Exponencial	0,6906	25,60755	0,01077	-	-
Hiperbólica	0,7123	-374,45770	-560,33070	-	-
Logística	0,7709	11,80512	0,04566	97,00000	-
Quadrática^(*)	0,9094	-65,44482	2,61052	-0,01072	-
Cúbica	0,9126	-27,86065	1,15156	0,00675	-6,50999E-05
Exponencial Quadrática	0,8735	4,75016	0,05243	-0,00023	-
Exponencial Cúbica	0,8759	2,62915	0,07539	-0,00050	1,02458E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.3 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica NÚMERO DE PLANTAS POR M², em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,5373	281,39170	-1,34901	-	-
Exponencial	0,5655	323,20820	-0,00867	-	-
Hiperbólica	0,4199	90,94230	-25,95140	-	-
Logística	0,4134	0,06299	-0,02679	294,00000	-
Quadrática	0,5392	297,54760	-1,79447	0,00258	-
Cúbica	0,5523	447,25710	-8,20812	0,08463	-3,20130E-04
Exponencial Quadrática	0,5705	268,90510	-0,00360	-0,00003	-
Exponencial Cúbica	0,5954	979,50390	-0,05898	0,00068	-2,76421E-06

TABELA B.4 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica NÚMERO DE FOLHAS VERDES POR PLANTA, em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,5975	19,33206	-0,13076	-	-
Exponencial	0,6100	72,97621	-0,03218	-	-
Hiperbólica	0,1498	0,40760	-46,37608	-	-
Logística	0,5213	0,04574	-0,04417	20,00000	-
Quadrática	0,7465	3,68695	0,30062	-0,00250	-
Cúbica	0,7917	-21,88652	1,39620	-0,01652	5,46848E-05
Exponencial Quadrática^(*)	0,8942	0,47571	0,10868	-0,00083	-
Exponencial Cúbica	0,9195	40,47946	-0,08320	0,00165	-9,79963E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.5 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,1936	849,62090	9,52434	-	-
Exponencial	0,2704	568,38680	0,01065	-	-
Hiperbólica	0,3832	-1331,22200	-163,06480	-	-
Logística	0,1136	2,79715	0,01985	2811,00000	-
Quadrática^(*)	0,8564	-3371,05000	125,89920	-0,67483	-
Cúbica	0,8566	-3560,17900	134,00160	-0,77849	4,04421E-04
Exponencial Quadrática	0,7553	18,64734	0,10487	-0,00055	-
Exponencial Cúbica	0,7758	2,32010	0,19415	-0,00169	4,45651E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.6 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,5013	0,36460	0,15712	-	-
Exponencial	0,5198	2,03677	0,01923	-	-
Hiperbólica	0,5402	-4,41333	-121,20260	-	-
Logística	0,4462	18,59171	0,00308	31,00000	-
Quadrática	0,7305	-25,11039	0,85953	-0,00407	-
Cúbica	0,7307	-27,53574	0,96343	-0,00540	5,18623E-06
Exponencial Quadrática^(*)	0,8174	0,06209	0,11547	-0,00056	-
Exponencial Cúbica	0,8506	0,00196	0,26361	-0,00245	7,39414E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.7 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA FRESCA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,2134	4,55263	-0,02657	-	-
Exponencial	0,4020	14,74094	-0,02967	-	-
Hiperbólica	0,1406	0,07568	-47,31137	-	-
Logística	0,3283	0,23469	-0,03410	8,00000	-
Quadrática	0,6213	-4,44423	0,21761	-0,00140	-
Cúbica	0,6961	-15,71625	0,69585	-0,00749	2,36325E-05
Exponencial Quadrática	0,8750	0,00772	0,17847	-0,00122	-
Exponencial Cúbica^(*)	0,8911	0,44384	0,00515	0,00100	-8,76374E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.8 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear^(*)	0,8705	-201,20800	7,02460	-	-
Exponencial	0,7157	28,35152	0,02656	-	-
Hiperbólica	0,4070	-71,38248	-110,29260	-	-
Logística	0,7191	115,10810	0,05765	789,00000	-
Quadrática	0,8795	-379,27470	11,93436	-0,02847	-
Cúbica	0,9115	577,55570	-29,05686	0,49594	-2,04603E-03
Exponencial Quadrática	0,8208	2,48477	0,09368	-0,00039	-
Exponencial Cúbica	0,8225	1,04009	0,13099	-0,00087	1,86224E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.9 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear^(*)	0,9063	-3,04300	0,08067	-	-
Exponencial	0,8281	0,15640	0,03182	-	-
Hiperbólica	0,6209	-0,56194	-108,88100	-	-
Logística	0,8538	149,66730	0,05000	10,00000	-
Quadrática	0,9090	-1,96749	0,05101	0,00017	-
Cúbica	0,9116	1,16640	-0,08324	0,00189	-6,70133E-06
Exponencial Quadrática	0,9204	0,01208	0,10244	-0,00041	-
Exponencial Cúbica	0,9289	0,00123	0,20032	-0,00166	4,88541E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.10 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica MASSA SECA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,1142	0,76427	-0,00354	-	-
Exponencial	0,2256	1,35884	-0,01871	-	-
Hiperbólica	0,1225	0,03297	-42,79680	-	-
Logística	0,1962	0,94051	-0,02034	2,00000	-
Quadrática	0,7362	-1,21312	0,05098	-0,00032	-
Cúbica	0,7719	-2,62276	0,11137	-0,00109	3,01431E-06
Exponencial Quadrática	0,8451	0,00110	0,18063	-0,00118	-
Exponencial Cúbica^(*)	0,8640	0,04348	0,02169	0,00087	-8,11666E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.11 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ÁREA FOLIAR DE FOLHAS VERDES (cm²/planta), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,2088	217,50180	-1,23575	-	-
Exponencial	0,3624	527,20640	-0,02530	-	-
Hiperbólica	0,1576	6,38200	-44,45192	-	-
Logística	0,2107	0,16958	-0,03230	330,00000	-
Quadrática	0,6862	-229,78950	11,09724	-0,07152	-
Cúbica	0,7854	-834,88790	37,02004	-0,40315	1,29391E-03
Exponencial Quadrática^(*)	0,8828	0,50416	0,16927	-0,00115	-
Exponencial Cúbica	0,8866	2,88124	0,09400	-0,00018	-3,84397E-06

^(*) Modelo escolhido

TABELA B.12 – Ajuste de equações dos dados experimentais da variável biofísica ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (cm²/cm²), em função de DAP

MODELO	R²	a	b	c	d
Linear	0,3505	4,38373	-0,02815	-	-
Exponencial	0,4914	16,88209	-0,03367	-	-
Hiperbólica	0,1656	0,05863	-46,63157	-	-
Logística	0,4007	0,10473	-0,04113	6,00000	-
Quadrática	0,6678	-2,02682	0,14860	-0,00102	-
Cúbica	0,7942	-14,04453	0,66345	-0,00761	2,56980E-05
Exponencial Quadrática^(*)	0,9134	0,01319	0,16656	-0,00119	-
Exponencial Cúbica	0,9210	0,22699	0,04370	0,00040	-6,27464E-06

^(*) Modelo escolhido

**ANEXO C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE F
DOS MODELOS DAS VARIÁVEIS BIOFÍSICAS**

**TABELA C.1 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
ALTURA (cm), em função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	14.240,4648	7.120,2324	135,5643**
Resíduo	27	1.418,1191	52,5229	
Total	29	15.658,5840		
Modelo: $y = -65,445 + 2,6105x - 0,0107x^2$				N = 30

** = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.2 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
NÚMERO DE FOLHAS VERDES POR PLANTA, em função de
DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	53,6630	26,8315	126,7652**
Resíduo	30	6,3499	0,2117	
Total	32	60,0129		
Modelo: $y = 0,4757 \exp (0,10868x - 0,00083x^2)$				N = 33

** = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.3 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em
função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	16.452.945,0000	8.226.472,5000	95,3911 ^{**}
Resíduo	32	2.759.660,8000	86.239,3980	
Total	34	19.212.606,0000		
Modelo: $y = -3371,05 + 125,899x - 0,6748x^2$				N = 35

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.4 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA FRESCA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta),
em função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	23,8844	11,9422	71,6535 ^{**}
Resíduo	32	5,3333	0,1667	
Total	34	29,2177		
Modelo: $y = 0,0621 \exp (0,1155x - 0,00056x^2)$				N = 35

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.5 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA FRESCA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função
de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	3	65,4253	21,8084	76,3482 ^{**}
Resíduo	28	7,9980	0,2856	
Total	31	73,4233		
Modelo: $y = 0,4438 \exp (0,00515x + 0,001x^2 - 8,764E-06x^3)$				N = 32

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.6 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/m²), em
função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	1	2.025.047,0000	2.025.047,0000	220,4192 ^{**}
Resíduo	33	303.179,3800	9.187,2539	
Total	34	2.328.226,5000		
Modelo: $y = -201,208 + 7,0246x$				N = 35

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.7 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA SECA DA PARTE AÉREA DA PLANTA (g/planta), em
função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	1	267,0614	267,0614	318,7454**
Resíduo	33	27,6491	0,8379	
Total	34	294,7105		
Modelo: $y = -3,043 + 0,0817x$				N = 35

** = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.8 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
MASSA SECA DE FOLHAS VERDES (g/planta), em função de
DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	3	47,5107	15,8369	61,4385**
Resíduo	29	7,4753	0,2578	
Total	32	54,9859		
Modelo: $y = 0,0435 \exp (0,0217x + 0,0009x^2 - 8,1167E-06x^3)$				N = 33

** = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.9 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
ÁREA FOLIAR DE FOLHAS VERDES (cm²/planta), em função
de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	55,1346	27,5673	112,9896 ^{**}
Resíduo	30	7,3194	0,2440	
Total	32	62,4540		
Modelo: $y = 0,5042 \exp (0,1693x - 0,00115x^2)$				N = 33

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**TABELA C.10 – Análise de variância de ajuste do modelo da variável biofísica
ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (cm²/cm²), em função de DAP**

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor de F
Regressão	2	74,4920	37,2460	158,3093 ^{**}
Resíduo	30	7,0582	0,2353	
Total	32	81,5502		
Modelo: $y = 0,01319 \exp (0,1666x - 0,00119x^2)$				N = 33

^{**} = Significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

**ANEXO D – TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV
DOS MODELOS DAS VARIÁVEIS BIOFÍSICAS**

TABELA D.1 - Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov (K.S.) de verificação da adequação dos modelos escolhidos das variáveis biofísicas

Variável	N ₁	N ₂	DS ^(*) total	Valores tabulares de DS _α	
Altura da planta	30	6	0,16667	α = 0,05	
Número de folhas verdes por planta	33	7	0,17143	N	DS_{0,05}
Massa fresca da parte aérea da planta por m ²	35	7	0,17143	30	0,24170
				32	0,23424
Massa fresca da parte aérea da planta por planta	35	7	0,17143	33	0,23076
				35	0,22425
Massa fresca de folhas por planta	32	7	0,15546	Observações: 1. Como N ₁ e N ₂ < 40 e N ₁ >> N ₂ , portanto, adota-se N = N ₁ . 2. Se DS < DS _{tabulado} , aceita-se a hipótese de que as distribuições (da amostra observada e da estimada pelo modelo) são iguais, a 5% de nível de significância.	
Massa seca da parte aérea da planta por m ²	35	7	0,17143		
Massa seca da parte aérea da planta por planta	35	7	0,14286		
Massa seca de folhas por planta	33	7	0,17143		
Área foliar por planta	33	7	0,20000		
Índice de área foliar	33	7	0,20000		

(*) Diferença Superior

**ANEXO E – ESPECTROS DE FATOR DE REFLECTÂNCIA
DO TRIGO**

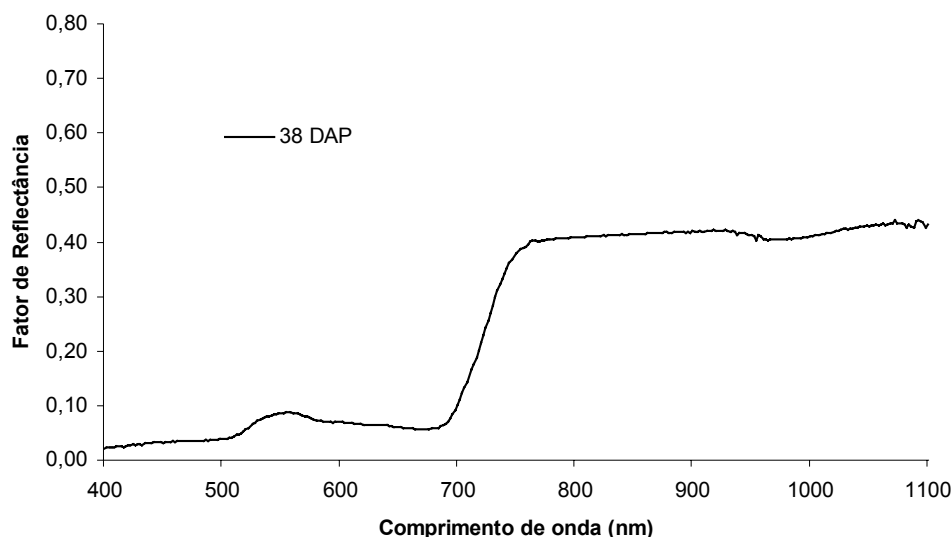


FIGURA E.1 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 38 dias após o plantio (DAP), no perfilhamento - estágio fenológico 5 da escala de Feekes, média de 15 observações.

TABELA E.1 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 38 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0214	0,0103	600	0,0699	0,0166	800	0,4084	0,1001	1000	0,4103	0,0777
410	0,0247	0,0086	610	0,0680	0,0184	810	0,4105	0,0997	1010	0,4139	0,0786
420	0,0264	0,0052	620	0,0650	0,0208	820	0,4105	0,0997	1020	0,4187	0,0798
430	0,0300	0,0080	630	0,0646	0,0223	830	0,4118	0,0990	1030	0,4235	0,0832
440	0,0311	0,0075	640	0,0642	0,0235	840	0,4137	0,0976	1040	0,4268	0,0829
450	0,0315	0,0094	650	0,0605	0,0266	850	0,4150	0,0959	1050	0,4286	0,0828
460	0,0338	0,0086	660	0,0588	0,0282	860	0,4152	0,0953	1060	0,4325	0,0836
470	0,0349	0,0090	670	0,0570	0,0288	870	0,4175	0,0963	1070	0,4338	0,0803
480	0,0353	0,0095	680	0,0582	0,0304	880	0,4175	0,0952	1080	0,4322	0,0859
490	0,0374	0,0099	690	0,0673	0,0300	890	0,4187	0,0949	1090	0,4385	0,0874
500	0,0383	0,0105	700	0,1011	0,0236	900	0,4197	0,0935	1100	0,4319	0,0825
510	0,0439	0,0099	710	0,1546	0,0124	910	0,4188	0,0914			
520	0,0564	0,0078	720	0,2142	0,0168	920	0,4206	0,0929			
530	0,0718	0,0056	730	0,2844	0,0434	930	0,4201	0,0893			
540	0,0810	0,0057	740	0,3429	0,0707	940	0,4176	0,0954			
550	0,0868	0,0062	750	0,3786	0,0885	950	0,4125	0,0846			
560	0,0868	0,0065	760	0,3954	0,0973	960	0,4050	0,0819			
570	0,0803	0,0083	770	0,4016	0,0998	970	0,4053	0,0785			
580	0,0733	0,0122	780	0,4055	0,1002	980	0,4049	0,0780			
590	0,0708	0,0141	790	0,4069	0,0993	990	0,4061	0,0761			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 15 observações

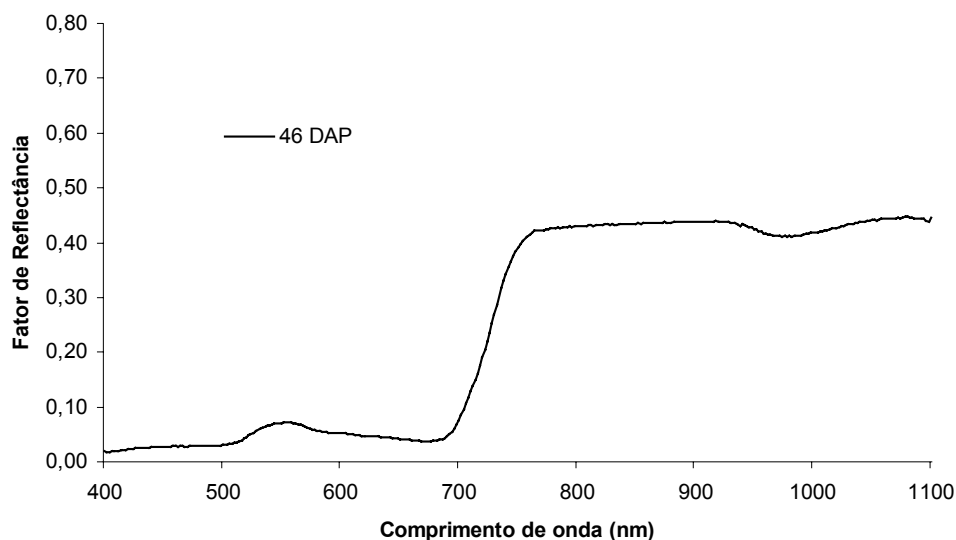


FIGURA E.2 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 46 dias após o plantio (DAP), no alongamento - estágio fenológico 6 da escala de Feekes, média de 17 observações.

TABELA E.2 - Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 46 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0195	0,0053	600	0,0522	0,0092	800	0,4282	0,0431	1000	0,4172	0,0298
410	0,0195	0,0058	610	0,0503	0,0100	810	0,4300	0,0426	1010	0,4221	0,0304
420	0,0230	0,0033	620	0,0472	0,0106	820	0,4301	0,0421	1020	0,4259	0,0307
430	0,0261	0,0027	630	0,0464	0,0110	830	0,4321	0,0413	1030	0,4324	0,0317
440	0,0268	0,0034	640	0,0449	0,0115	840	0,4322	0,0414	1040	0,4363	0,0307
450	0,0279	0,0041	650	0,0416	0,0122	850	0,4335	0,0402	1050	0,4410	0,0336
460	0,0290	0,0038	660	0,0397	0,0127	860	0,4343	0,0400	1060	0,4424	0,0334
470	0,0283	0,0041	670	0,0379	0,0129	870	0,4356	0,0402	1070	0,4431	0,0334
480	0,0283	0,0041	680	0,0391	0,0135	880	0,4356	0,0403	1080	0,4460	0,0333
490	0,0290	0,0049	690	0,0463	0,0137	890	0,4371	0,0395	1090	0,4419	0,0299
500	0,0304	0,0047	700	0,0767	0,0130	900	0,4366	0,0394	1100	0,4435	0,0352
510	0,0346	0,0048	710	0,1281	0,0104	910	0,4369	0,0392			
520	0,0451	0,0046	720	0,1906	0,0085	920	0,4367	0,0389			
530	0,0592	0,0042	730	0,2698	0,0139	930	0,4357	0,0375			
540	0,0671	0,0045	740	0,3427	0,0250	940	0,4328	0,0381			
550	0,0712	0,0044	750	0,3903	0,0348	950	0,4231	0,0344			
560	0,0712	0,0048	760	0,4129	0,0405	960	0,4149	0,0319			
570	0,0641	0,0063	770	0,4212	0,0424	970	0,4119	0,0300			
580	0,0570	0,0077	780	0,4248	0,0428	980	0,4117	0,0296			
590	0,0535	0,0082	790	0,4268	0,0431	990	0,4128	0,0307			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 17 observações

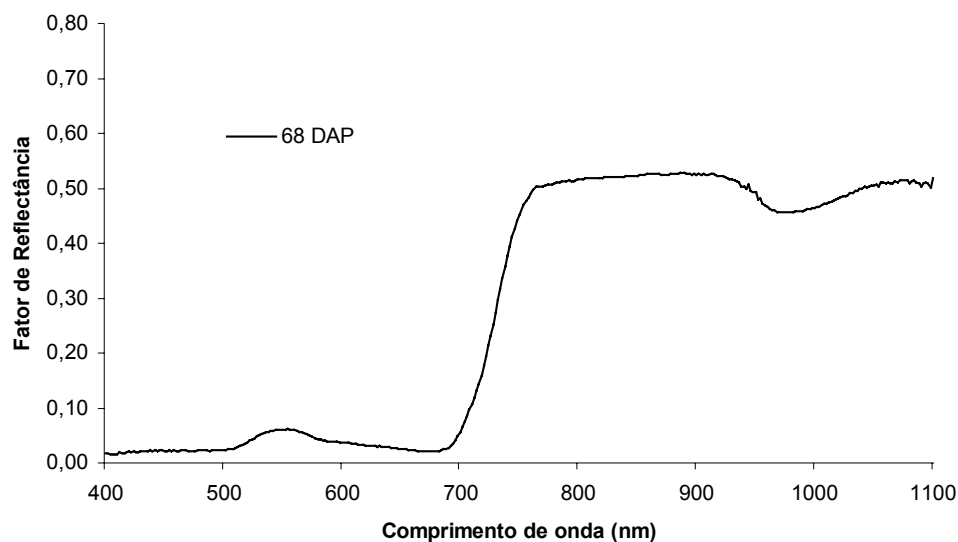


FIGURA E.3 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 68 dias após o plantio (DAP), no emborrachamento - estágio fenológico 10 da escala de Feekes, média de 5 observações.

TABELA E.3 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 68 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0177	0,0076	600	0,0376	0,0053	800	0,5156	0,0853	1000	0,4640	0,0694
410	0,0163	0,0034	610	0,0348	0,0050	810	0,5187	0,0855	1010	0,4715	0,0698
420	0,0208	0,0041	620	0,0320	0,0044	820	0,5188	0,0854	1020	0,4809	0,0727
430	0,0223	0,0043	630	0,0301	0,0043	830	0,5198	0,0853	1030	0,4907	0,0751
440	0,0213	0,0039	640	0,0286	0,0037	840	0,5218	0,0821	1040	0,4984	0,0738
450	0,0221	0,0044	650	0,0249	0,0033	850	0,5229	0,0852	1050	0,5040	0,0762
460	0,0215	0,0040	660	0,0231	0,0031	860	0,5265	0,0824	1060	0,5095	0,0749
470	0,0222	0,0042	670	0,0213	0,0034	870	0,5246	0,0804	1070	0,5114	0,0782
480	0,0226	0,0043	680	0,0218	0,0031	880	0,5259	0,0782	1080	0,5092	0,0720
490	0,0225	0,0038	690	0,0280	0,0037	890	0,5277	0,0785	1090	0,5021	0,0738
500	0,0237	0,0043	700	0,0562	0,0079	900	0,5240	0,0774	1100	0,5180	0,0707
510	0,0271	0,0049	710	0,1074	0,0163	910	0,5239	0,0788			
520	0,0369	0,0059	720	0,1761	0,0272	920	0,5224	0,0795			
530	0,0506	0,0083	730	0,2740	0,0433	930	0,5167	0,0798			
540	0,0579	0,0102	740	0,3765	0,0614	940	0,5024	0,0805			
550	0,0611	0,0099	750	0,4511	0,0761	950	0,4933	0,0739			
560	0,0592	0,0101	760	0,4908	0,0833	960	0,4654	0,0724			
570	0,0516	0,0083	770	0,5039	0,0882	970	0,4571	0,0683			
580	0,0436	0,0066	780	0,5085	0,0856	980	0,4570	0,0692			
590	0,0394	0,0064	790	0,5130	0,0866	990	0,4591	0,0686			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 5 observações

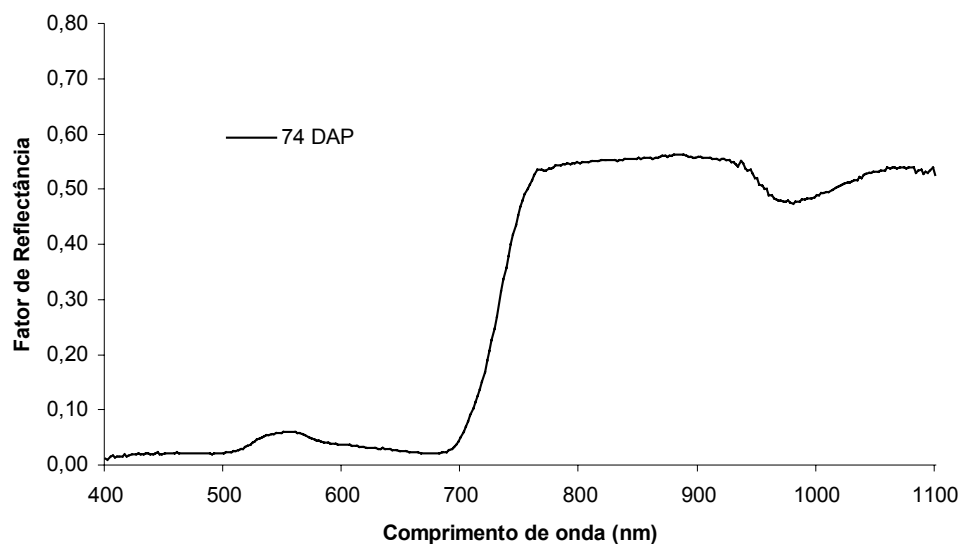


FIGURA E.4 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 74 dias após o plantio (DAP), no espigamento - estágio fenológico 10.2 da escala de Feekes, média de 15 observações.

TABELA E.4 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 74 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0116	0,0043	600	0,0377	0,0054	800	0,5496	0,0905	1000	0,4915	0,0831
410	0,0146	0,0020	610	0,0352	0,0044	810	0,5527	0,0912	1010	0,4979	0,0838
420	0,0181	0,0016	620	0,0315	0,0040	820	0,5553	0,0912	1020	0,5080	0,0854
430	0,0190	0,0027	630	0,0299	0,0037	830	0,5552	0,0906	1030	0,5178	0,0856
440	0,0187	0,0011	640	0,0290	0,0034	840	0,5569	0,0896	1040	0,5285	0,0837
450	0,0216	0,0037	650	0,0251	0,0026	850	0,5587	0,0907	1050	0,5350	0,0827
460	0,0220	0,0030	660	0,0227	0,0027	860	0,5580	0,0872	1060	0,5410	0,0843
470	0,0215	0,0023	670	0,0206	0,0020	870	0,5626	0,0925	1070	0,5409	0,0804
480	0,0204	0,0025	680	0,0215	0,0022	880	0,5653	0,0949	1080	0,5398	0,0805
490	0,0203	0,0017	690	0,0269	0,0029	890	0,5630	0,0913	1090	0,5319	0,0759
500	0,0219	0,0024	700	0,0513	0,0065	900	0,5619	0,0908	1100	0,5248	0,0766
510	0,0254	0,0030	710	0,1025	0,0156	910	0,5607	0,0903			
520	0,0342	0,0044	720	0,1700	0,0255	920	0,5584	0,0879			
530	0,0484	0,0072	730	0,2711	0,0438	930	0,5512	0,0872			
540	0,0568	0,0092	740	0,3809	0,0620	940	0,5401	0,0937			
550	0,0599	0,0101	750	0,4695	0,0785	950	0,5227	0,0838			
560	0,0597	0,0098	760	0,5191	0,0875	960	0,4922	0,0760			
570	0,0520	0,0079	770	0,5366	0,0893	970	0,4829	0,0821			
580	0,0438	0,0056	780	0,5452	0,0949	980	0,4771	0,0795			
590	0,0392	0,0050	790	0,5485	0,0937	990	0,4834	0,0821			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 15 observações

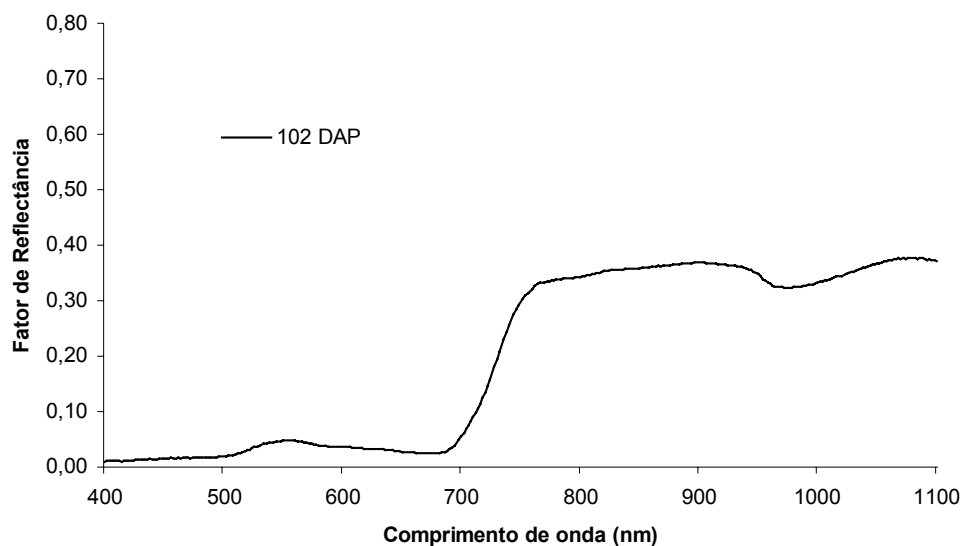


FIGURA E.5 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 102 dias após o plantio (DAP), na maturação - início - estágio fenológico 11.2 da escala de Feekes, média de 25 observações.

TABELA E.5 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 102 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0094	0,0011	600	0,0363	0,0018	800	0,3433	0,0230	1000	0,3324	0,0157
410	0,0110	0,0013	610	0,0349	0,0021	810	0,3475	0,0230	1010	0,3382	0,0156
420	0,0111	0,0015	620	0,0332	0,0021	820	0,3534	0,0249	1020	0,3451	0,0166
430	0,0131	0,0015	630	0,0322	0,0022	830	0,3558	0,0263	1030	0,3519	0,0183
440	0,0142	0,0007	640	0,0307	0,0024	840	0,3569	0,0256	1040	0,3605	0,0166
450	0,0152	0,0001	650	0,0279	0,0023	850	0,3586	0,0248	1050	0,3669	0,0177
460	0,0163	0,0007	660	0,0262	0,0024	860	0,3612	0,0241	1060	0,3731	0,0185
470	0,0167	0,0003	670	0,0244	0,0023	870	0,3627	0,0246	1070	0,3745	0,0173
480	0,0169	0,0006	680	0,0247	0,0025	880	0,3649	0,0247	1080	0,3763	0,0202
490	0,0177	0,0008	690	0,0320	0,0031	890	0,3674	0,0246	1090	0,3748	0,0191
500	0,0193	0,0009	700	0,0550	0,0034	900	0,3693	0,0255	1100	0,3706	0,0190
510	0,0227	0,0012	710	0,0904	0,0032	910	0,3675	0,0245			
520	0,0300	0,0009	720	0,1350	0,0062	920	0,3651	0,0235			
530	0,0389	0,0013	730	0,1945	0,0117	930	0,3629	0,0223			
540	0,0444	0,0015	740	0,2550	0,0183	940	0,3574	0,0208			
550	0,0472	0,0010	750	0,2986	0,0225	950	0,3476	0,0183			
560	0,0475	0,0009	760	0,3220	0,0240	960	0,3301	0,0193			
570	0,0439	0,0011	770	0,3330	0,0249	970	0,3244	0,0198			
580	0,0392	0,0013	780	0,3379	0,0246	980	0,3246	0,0190			
590	0,0371	0,0013	790	0,3404	0,0230	990	0,3272	0,0179			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 25 observações

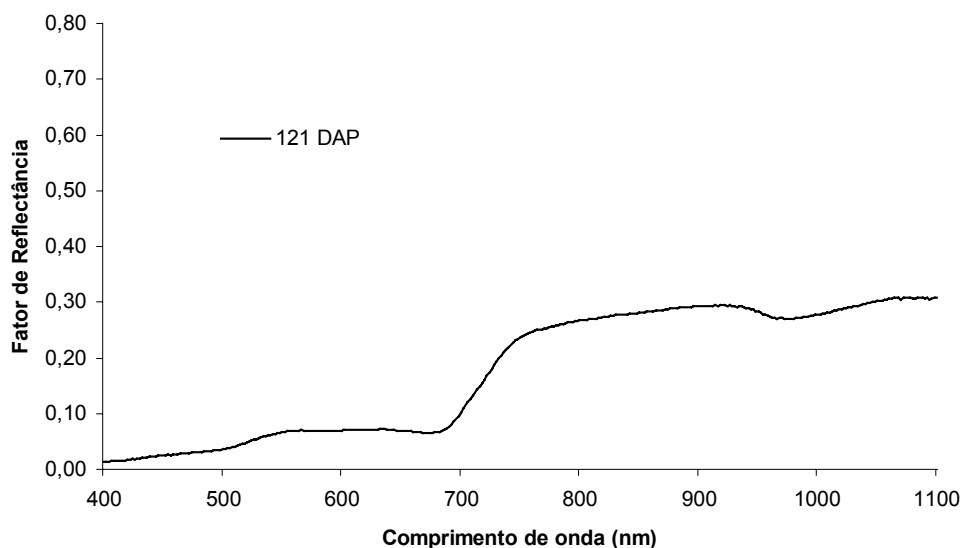


FIGURA E.6 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 121 dias após o plantio (DAP), na maturação - média - estágio fenológico 11.3 da escala de Feekes, média de 20 observações.

TABELA E.6 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 121 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0142	0,0012	600	0,0698	0,0142	800	0,2673	0,0146	1000	0,2773	0,0126
410	0,0154	0,0020	610	0,0701	0,0145	810	0,2697	0,0142	1010	0,2820	0,0128
420	0,0176	0,0025	620	0,0700	0,0151	820	0,2728	0,0137	1020	0,2875	0,0133
430	0,0195	0,0037	630	0,0715	0,0156	830	0,2766	0,0137	1030	0,2924	0,0128
440	0,0224	0,0038	640	0,0713	0,0157	840	0,2783	0,0149	1040	0,2967	0,0126
450	0,0245	0,0047	650	0,0687	0,0158	850	0,2806	0,0145	1050	0,3017	0,0127
460	0,0271	0,0048	660	0,0678	0,0159	860	0,2837	0,0142	1060	0,3056	0,0140
470	0,0288	0,0059	670	0,0656	0,0165	870	0,2860	0,0134	1070	0,3050	0,0129
480	0,0306	0,0063	680	0,0667	0,0166	880	0,2893	0,0123	1080	0,3059	0,0122
490	0,0329	0,0067	690	0,0770	0,0182	890	0,2907	0,0133	1090	0,3054	0,0138
500	0,0360	0,0073	700	0,1021	0,0197	900	0,2928	0,0143	1100	0,3081	0,0113
510	0,0407	0,0080	710	0,1320	0,0201	910	0,2932	0,0156			
520	0,0480	0,0086	720	0,1610	0,0185	920	0,2952	0,0154			
530	0,0563	0,0088	730	0,1927	0,0159	930	0,2936	0,0166			
540	0,0619	0,0092	740	0,2191	0,0129	940	0,2885	0,0142			
550	0,0665	0,0100	750	0,2369	0,0127	950	0,2827	0,0153			
560	0,0695	0,0112	760	0,2466	0,0130	960	0,2731	0,0146			
570	0,0694	0,0118	770	0,2522	0,0132	970	0,2709	0,0138			
580	0,0684	0,0128	780	0,2581	0,0140	980	0,2704	0,0139			
590	0,0685	0,0133	790	0,2632	0,0150	990	0,2735	0,0128			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 20 observações

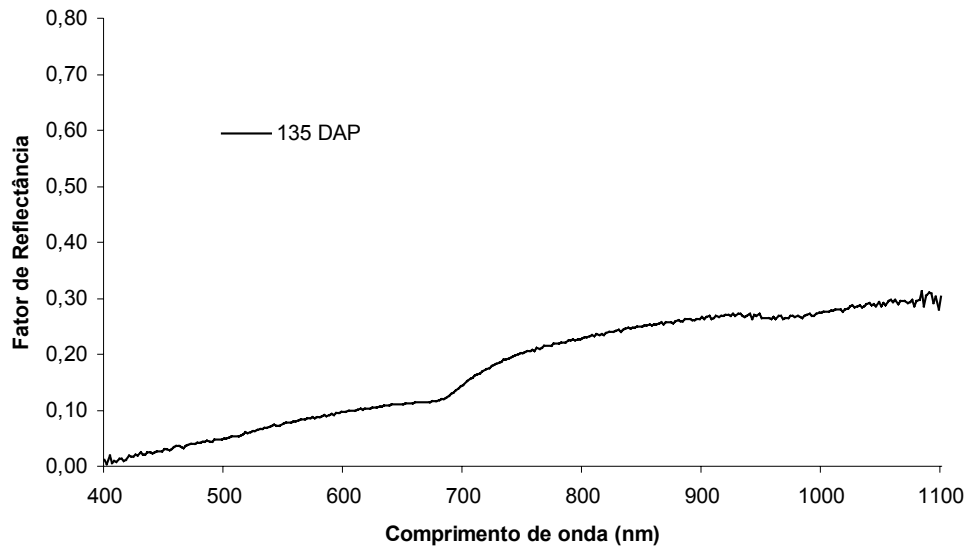


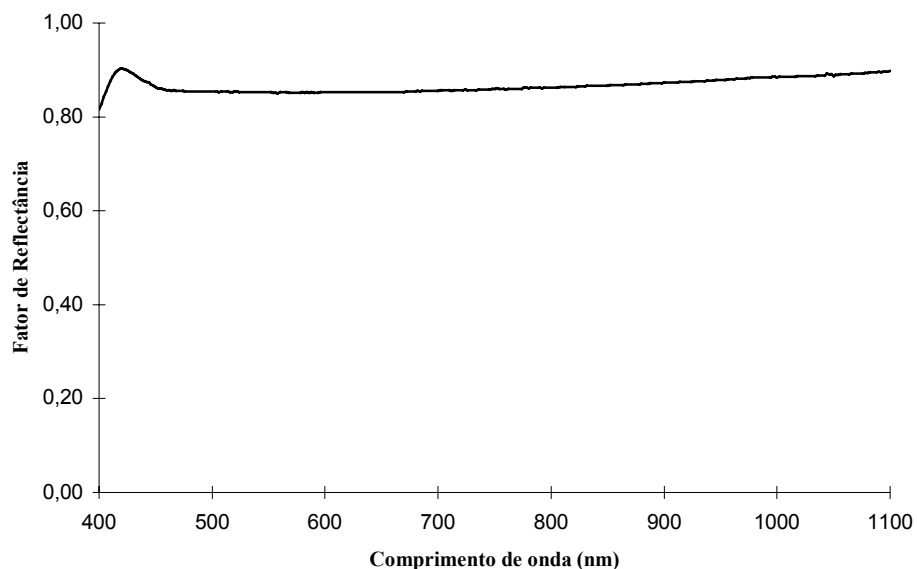
FIGURA E.7 - Espectro de fator de reflectância do trigo cultivar IAC-24, aos 135 dias após o plantio (DAP), na maturação - colheita - estágio fenológico 11.4 da escala de Feekes, média de 24 observações.

TABELA E.7 – Fator de reflectância médio do trigo cultivar IAC-24, aos 135 dias após o plantio

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,0122	0,0191	600	0,0976	0,0172	800	0,2288	0,0160	1000	0,2736	0,0241
410	0,0084	0,0131	610	0,0999	0,0213	810	0,2327	0,0159	1010	0,2781	0,0225
420	0,0190	0,0103	620	0,1025	0,0222	820	0,2386	0,0160	1020	0,2799	0,0246
430	0,0247	0,0048	630	0,1073	0,0228	830	0,2435	0,0161	1030	0,2852	0,0233
440	0,0225	0,0145	640	0,1096	0,0244	840	0,2458	0,0149	1040	0,2909	0,0235
450	0,0298	0,0145	650	0,1114	0,0247	850	0,2496	0,0168	1050	0,2867	0,0251
460	0,0363	0,0061	660	0,1140	0,0257	860	0,2537	0,0175	1060	0,2938	0,0232
470	0,0382	0,0077	670	0,1134	0,0274	870	0,2565	0,0152	1070	0,2947	0,0308
480	0,0412	0,0095	680	0,1178	0,0273	880	0,2617	0,0174	1080	0,2945	0,0223
490	0,0441	0,0123	690	0,1289	0,0281	890	0,2624	0,0182	1090	0,3096	0,0354
500	0,0496	0,0114	700	0,1451	0,0260	900	0,2669	0,0200	1100	0,3019	0,0424
510	0,0540	0,0117	710	0,1612	0,0222	910	0,2645	0,0173			
520	0,0590	0,0134	720	0,1738	0,0210	920	0,2707	0,0179			
530	0,0660	0,0143	730	0,1857	0,0151	930	0,2730	0,0196			
540	0,0719	0,0150	740	0,1952	0,0134	940	0,2727	0,0284			
550	0,0757	0,0133	750	0,2027	0,0149	950	0,2652	0,0274			
560	0,0808	0,0161	760	0,2065	0,0135	960	0,2659	0,0279			
570	0,0853	0,0145	770	0,2149	0,0121	970	0,2643	0,0266			
580	0,0876	0,0161	780	0,2195	0,0149	980	0,2680	0,0262			
590	0,0929	0,0182	790	0,2247	0,0145	990	0,2714	0,0246			

λ : Comprimento de onda R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 24 observações

**ANEXO F – ESPECTRO DE FATOR DE REFLECTÂNCIA
DA PLACA DE REFERÊNCIA**



**FIGURA F.1 - Espectro de fator de reflectância da placa de referência de BaSO₄,
média de 10 observações.**

TABELA F.1 – Fator de reflectância médio da placa de referência de BaSO₄

λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP	λ	R	DP
400	0,8163	0,0539	600	0,8522	0,0234	800	0,8624	0,0199	1000	0,8846	0,0129
410	0,8767	0,0412	610	0,8525	0,0230	810	0,8633	0,0193	1010	0,8850	0,0133
420	0,9025	0,0355	620	0,8529	0,0230	820	0,8640	0,0190	1020	0,8861	0,0123
430	0,8921	0,0320	630	0,8526	0,0224	830	0,8656	0,0184	1030	0,8867	0,0122
440	0,8753	0,0302	640	0,8528	0,0224	840	0,8662	0,0182	1040	0,8882	0,0126
450	0,8630	0,0271	650	0,8529	0,0219	850	0,8668	0,0181	1050	0,8871	0,0121
460	0,8571	0,0271	660	0,8528	0,0218	860	0,8676	0,0180	1060	0,8909	0,0118
470	0,8553	0,0260	670	0,8530	0,0213	870	0,8689	0,0177	1070	0,8924	0,0113
480	0,8540	0,0256	680	0,8544	0,0212	880	0,8698	0,0173	1080	0,8938	0,0107
490	0,8539	0,0251	690	0,8548	0,0212	890	0,8713	0,0169	1090	0,8957	0,0106
500	0,8540	0,0245	700	0,8559	0,0213	900	0,8725	0,0164	1100	0,8975	0,0104
510	0,8536	0,0243	710	0,8563	0,0212	910	0,8733	0,0159			
520	0,8535	0,0240	720	0,8568	0,0218	920	0,8745	0,0156			
530	0,8527	0,0240	730	0,8574	0,0214	930	0,8756	0,0153			
540	0,8522	0,0239	740	0,8582	0,0208	940	0,8771	0,0147			
550	0,8521	0,0239	750	0,8592	0,0203	950	0,8786	0,0149			
560	0,8529	0,0238	760	0,8580	0,0218	960	0,8801	0,0144			
570	0,8516	0,0239	770	0,8600	0,0212	970	0,8818	0,0140			
580	0,8522	0,0236	780	0,8615	0,0204	980	0,8838	0,0136			
590	0,8520	0,0233	790	0,8618	0,0204	990	0,8843	0,0130			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Fator de Reflectância DP: Desvio Padrão n= 10 observações

ANEXO G – VARIÁVEIS ESPECTRAIS

TABELA G.1 - Reflectância no canal 1 (580 - 680 nm) do AVHRR ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV (%)
143	38	0,05465	0,08622	0,07469	0,04621	0,03630	0,05961	0,02051	34,41
151	46	0,05551	0,03848	0,03297	0,03486	0,05094	0,04255	0,01007	23,67
173	68	0,03321	0,02563	0,03052	0,02288	0,02898	0,02824	0,00406	14,38
179	74	0,02446	0,02772	0,02508	0,03014	0,03263	0,02801	0,00343	12,26
207	102	0,03047	0,02963	0,02979	0,02999	0,02588	0,02915	0,00186	6,37
226	121	0,06417	0,07212	0,07861	0,04142	sd	0,06408	0,01622	25,31
240	135	0,09822	0,12005	0,11397	0,08668	0,06815	0,09741	0,02097	21,53

DDA – Dias decorridos no ano DAP – Dias após o plantio sd - sem dados
DP – Desvio padrão CV – Coeficiente de variação

TABELA G.2 - Reflectância no canal 2 (725 - 1100 nm) do AVHRR ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV (%)
143	38	0,47716	0,29555	0,31083	0,40511	0,45980	0,38969	0,08349	21,43
151	46	0,37543	0,42928	0,41085	0,43799	0,36050	0,40281	0,03370	8,37
173	68	0,51371	0,47033	0,55011	0,35952	0,44929	0,46859	0,07238	15,45
179	74	0,40001	0,49831	0,43288	0,53848	0,60048	0,49403	0,08047	16,29
207	102	0,32519	0,29661	0,32692	0,33965	0,34950	0,32757	0,01995	6,09
226	121	0,26428	0,24812	0,28383	0,26099	sd	0,26431	0,01477	5,59
240	135	0,24700	0,26585	0,25877	0,22780	0,22149	0,24418	0,01919	7,86

TABELA G.3 - Razão (RATIO) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV (%)
143	38	8,73120	3,42786	4,16166	8,76672	12,66667	6,53691	3,79239	58,01
151	46	6,76329	11,15593	12,46133	12,56426	7,07695	9,46630	2,87185	30,34
173	68	15,46853	18,35076	18,02457	15,71329	15,50345	16,59085	1,44592	8,72
179	74	16,35364	17,97655	17,25997	17,86596	18,40270	17,64022	0,79402	4,50
207	102	10,67246	10,01046	10,97415	11,32544	13,50464	11,23676	1,32513	11,79
226	121	4,11844	3,44038	3,61061	6,30106	sd	4,12461	1,32075	32,02
240	135	2,51476	2,21449	2,27051	2,62806	3,25004	2,50664	0,41376	16,51

TABELA G.4 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV (%)
143	38	0,79448	0,54831	0,61253	0,79522	0,85366	0,73464	0,13237	18,02
151	46	0,74238	0,83547	0,85143	0,85255	0,75238	0,80891	0,05481	6,78
173	68	0,87856	0,89664	0,89487	0,88033	0,87881	0,88630	0,00910	1,03
179	74	0,88475	0,89461	0,89047	0,89399	0,89692	0,89271	0,00474	0,53
207	102	0,82866	0,81835	0,83297	0,83773	0,86211	0,83656	0,01627	1,95
226	121	0,60926	0,54959	0,56622	0,72607	sd	0,60973	0,07960	13,05
240	135	0,43097	0,37782	0,38847	0,44874	0,52942	0,42965	0,06032	14,04

TABELA G.5 - Índice de Vegetação Transformada (TVI) ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo

DDA	DAP	Dados 1	Dados 2	Dados 3	Dados 4	Dados 5	Média	DP	CV (%)
143	38	1,13775	1,02387	1,05476	1,13808	1,16347	1,11114	0,06058	5,45
151	46	1,11462	1,15563	1,16251	1,16299	1,11910	1,14408	0,02406	2,10
173	68	1,17412	1,18180	1,18105	1,17488	1,17423	1,17741	0,00386	0,33
179	74	1,17675	1,18093	1,17918	1,18067	1,18191	1,18013	0,00201	0,17
207	102	1,15267	1,14820	1,15454	1,15660	1,16710	1,15610	0,00703	0,61
226	121	1,05321	1,02449	1,03258	1,10728	sd	1,05344	0,03727	3,54
240	135	0,96487	0,93692	0,94259	0,97403	1,01460	0,96419	0,03090	3,21

ANEXO H – RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

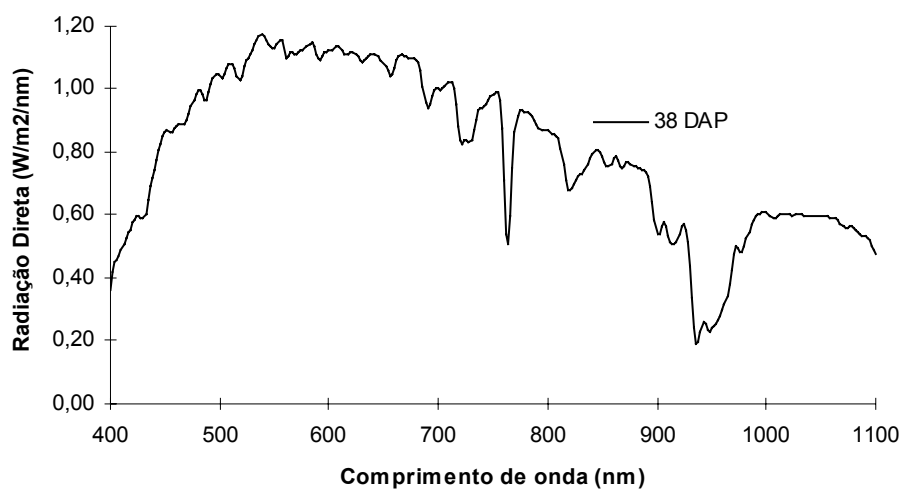


FIGURA H.1 - Radiação solar direta aos 38 dias após o plantio (DAP), média de 4 observações.

TABELA H.1 – Radiação solar direta aos 38 dias após o plantio

λ	RD	DP	λ	RD	DP	λ	RD	DP	λ	RD	DP
400	0,3647	0,0075	600	1,1233	0,0212	800	0,8678	0,0152	1000	0,6092	0,0118
410	0,4858	0,0105	610	1,1305	0,0212	810	0,8416	0,0142	1010	0,5960	0,0115
420	0,5750	0,0112	620	1,1188	0,0199	820	0,6802	0,0126	1020	0,6026	0,0120
430	0,5884	0,0124	630	1,0878	0,0194	830	0,7274	0,0135	1030	0,6009	0,0133
440	0,7420	0,0151	640	1,1113	0,0184	840	0,7921	0,0141	1040	0,5985	0,0131
450	0,8638	0,0176	650	1,0803	0,0190	850	0,7873	0,0136	1050	0,5960	0,0138
460	0,8821	0,0177	660	1,0678	0,0188	860	0,7817	0,0145	1060	0,5899	0,0141
470	0,9001	0,0196	670	1,1035	0,0196	870	0,7547	0,0130	1070	0,5652	0,0137
480	0,9954	0,0189	680	1,0948	0,0211	880	0,7536	0,0135	1080	0,5594	0,0133
490	0,9891	0,0205	690	0,9409	0,0159	890	0,7356	0,0139	1090	0,5320	0,0128
500	1,0425	0,0207	700	1,0037	0,0172	900	0,5410	0,0100	1100	0,4771	0,0120
510	1,0823	0,0211	710	1,0227	0,0166	910	0,5338	0,0102			
520	1,0438	0,0201	720	0,8364	0,0150	920	0,5391	0,0103			
530	1,1250	0,0216	730	0,8405	0,0156	930	0,4376	0,0088			
540	1,1680	0,0217	740	0,9418	0,0169	940	0,2288	0,0055			
550	1,1320	0,0224	750	0,9843	0,0176	950	0,2389	0,0052			
560	1,0973	0,0199	760	0,7106	0,0195	960	0,2964	0,0066			
570	1,1138	0,0195	770	0,8605	0,0157	970	0,4732	0,0085			
580	1,1348	0,0209	780	0,9272	0,0161	980	0,5010	0,0092			
590	1,0973	0,0199	790	0,8902	0,0160	990	0,5955	0,0107			

λ : Comprimento de onda (nm) RD: Radiação solar direta DP: Desvio Padrão n= 4 observações

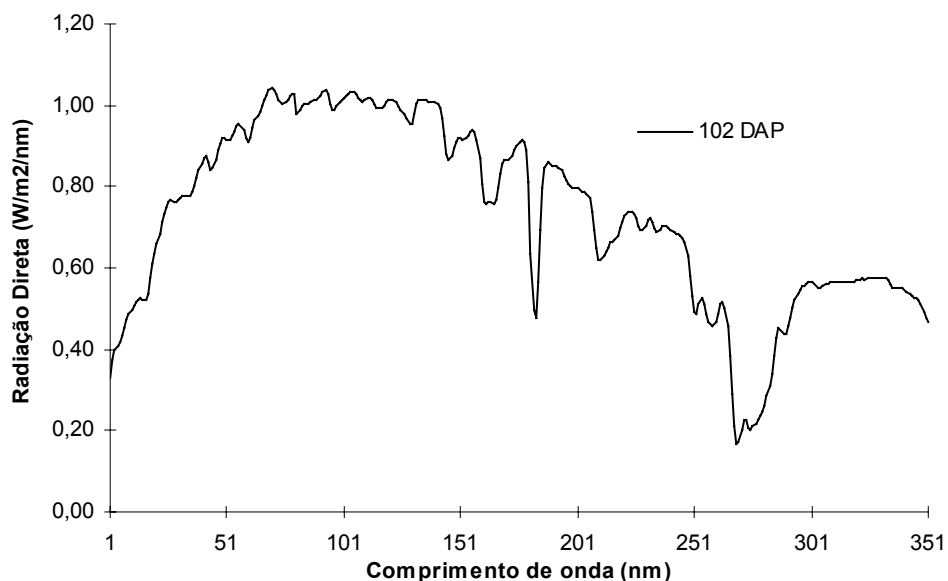


FIGURA H.2 - Radiação solar direta aos 102 dias após o plantio (DAP), média de 3 observações.

TABELA H.2 – Radiação solar direta aos 102 dias após o plantio

λ	RD	DP	λ	RD	DP	λ	RD	DP	λ	RD	DP
400	0,3271	0,0349	600	1,0168	0,1124	800	0,7956	0,0907	1000	0,5632	0,0693
410	0,4337	0,0467	610	1,0266	0,1133	810	0,7702	0,0890	1010	0,5551	0,0689
420	0,5044	0,0540	620	1,0168	0,1122	820	0,6207	0,0713	1020	0,5651	0,0708
430	0,5194	0,0560	630	0,9915	0,1100	830	0,6655	0,0775	1030	0,5677	0,0714
440	0,6569	0,0708	640	1,0137	0,1121	840	0,7279	0,0846	1040	0,5702	0,0725
450	0,7627	0,0826	650	0,9838	0,1086	850	0,7243	0,0852	1050	0,5745	0,0738
460	0,7718	0,0839	660	0,9765	0,1089	860	0,7191	0,0846	1060	0,5745	0,0744
470	0,7855	0,0842	670	1,0111	0,1131	870	0,6938	0,0820	1070	0,5529	0,0719
480	0,8707	0,0943	680	1,0011	0,1156	880	0,6923	0,0822	1080	0,5474	0,0712
490	0,8649	0,0941	690	0,8633	0,0965	890	0,6748	0,0802	1090	0,5238	0,0680
500	0,9152	0,1000	700	0,9191	0,1038	900	0,4913	0,0585	1100	0,4678	0,0615
510	0,9530	0,1038	710	0,9380	0,1061	910	0,4854	0,0581			
520	0,9209	0,1016	720	0,7626	0,0853	920	0,4891	0,0583			
530	0,9966	0,1092	730	0,7672	0,0860	930	0,3854	0,0460			
540	1,0364	0,1131	740	0,8667	0,0984	940	0,2008	0,0242			
550	1,0065	0,1104	750	0,9083	0,1026	950	0,2094	0,0261			
560	0,9803	0,1072	760	0,6362	0,0719	960	0,2629	0,0319			
570	1,0024	0,1105	770	0,7963	0,0904	970	0,4292	0,0521			
580	1,0246	0,1126	780	0,8519	0,0975	980	0,4560	0,0557			
590	0,9895	0,1087	790	0,8163	0,0939	990	0,5472	0,0672			

λ : Comprimento de onda (nm) R: Radiação solar direta DP: Desvio Padrão n= 3 observações

ANEXO I – FOTOGRAFIAS DA ÁREA DE ESTUDO



FIGURA I.1 - Área de estudo no dia 22/06/1995, com o trigo ao 68 dias após o plantio, no estágio de emborrachamento.



FIGURA I.2 - Área de estudo no dia 28/06/1995, com o trigo aos 74 dias após o plantio, no início do estágio de espigamento.



FIGURA I.3 - Área de estudo no dia 14/08/1995, com o trigo aos 121 dias após o plantio, no estágio de maturação média.



FIGURA I.4 - Área de estudo no dia 28/08/1995, com o trigo aos 135 dias após o plantio, no estágio de maturação final ou ponto de colheita.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASE, J. K. Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat. **Agron. J.**, v. 70, p. 563-565, 1978.

AHLRICHS, J. S.; BAUER, M. E. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. **Agron. J.**, v. 75, p. 987-993, 1983.

ALMEIDA, C. A. S. de. **Estimativa da temperatura de superfície cultivada com trigo (*Triticum aestivum* L.), usando dados NOAA-14/AVHRR.** Campinas: UNICAMP, 1996. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T. et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agron. J.**, v. 76, p. 300-306, 1984.

BARET, F. **Contribution au suivi radiometrique de cultures de cereales.** Paris: Centre D'Orsay, 1986. 186p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universite de Paris-Sud, 1986.

BARET, F.; CHAMPION, I.; GUYOT, G. et al. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. **Remote Sens. Environ.**, v. 22, p. 367-378, 1987.

_____; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sens. Environ.**, v. 35, p. 161-173, 1991.

BARRETT, E. C.; CURTIS, L. F. **Introduction to environmental remote sensing**. 3. ed. London: Chapman & Hall. 1992. 412 p.

BOARETTO, A. E.; SPOLIDÓRIO, E. S.; FREITAS, J. G. et al. **Nuclear techniques for optimizing the N fertilizer application in wheat under irrigated conditions**. Piracicaba, 1997. 12 p. (Relatório de pesquisa).

BOISSARD, P.; POINTEL, J. G.; HUET, P. Reflectance, green leaf area index and ear hydric status of wheat from anthesis until maturity. **Int. J. Remote Sensing**, v. 14, n. 14, p. 2713-2729, 1993.

BOWKER, D. E.; DAVIS, R. E.; MYRICK, D. L. et al. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies**. Washington: National Aeronautics and Space Administration - NASA, 1985. 184 p. (Reference Publication, 1139).

CAMARGO, C. E. O.; FELÍCIO, J. C. Trigo irrigado. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Instruções agrícolas para o Estado de São Paulo**. 5. ed. rev. atual. Campinas, 1990. 233p. (Boletim, 200).

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Indicadores da agropecuária**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2001.

CSBPT – COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO. **Indicações técnicas da comissão sul-brasileira de pesquisa de trigo – 2001**. Passo Fundo:

Reunião da CSBPT, 8, 2001. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br>>. Acesso em: 03 set. 2001.

DUGGIN, M. J. The field measurement of reflectance factors. **Photogram. Engr. and Remote Sensing**, v. 46, n.5, p. 643-647, 1980.

DUGGIN, M. J.; CUNIA, T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison. **Applied Optics**, v. 22, n. 23, p. 3771-3777, 1983.

FAO – Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT**: Statistical Databases. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 27 jan. 2000.

FAO – Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT**: Statistical Databases. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 27 ago. 2001.

FELÍCIO, J. C.; CAMARGO, C. E. O.; FERREIRA FILHO, A. W. P. et al. Tocantins (IAC-23) e Tucuruí (IAC-24): novos cultivares de trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 47, n. 1, p. 93-107, 1988.

FÉRNANDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E. et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. **Int. J. Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 1867-1884, 1994.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. **Estatística aplicada**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 1985. 267 p.

FONTOURA, J. U. G.; FABRÍCIO, A. C.; HAAG, H. P. **Matéria seca, absorção e exportação de macro e micronutrientes pelo trigo, sob regime de sequeiro e irrigado em Latossolo Roxo**. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 83p.

FORMAGGIO, A. R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão**. Piracicaba: ESALQ, 1989. 163p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1989.

FUNDAÇÃO SEADE - SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Anuário Estatístico do Estado de São Paulo - 1999**. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2001.

GSC - GENERAL SCIENCES CORPORATION. **METPRO workstation user's guide**. 1992.

GERVIN, J. C.; KERBER, A. G.; WITT, R. G. et al. Comparison of level I land-cover classification accuracy for MSS and AVHRR data. **Int. J. Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 47-57, 1985.

GREGORY, S. **Statistical methods and the geographer**. 3. ed. London: Longman Group Ltd., 1973. 271 p.

GUPTA, R. K. Comparative study of AVHRR ratio vegetation index and normalized difference vegetation index in district level agricultural monitoring. **Int. J. Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 53-73, 1993.

GUYOT, G. Propriétés spectrales des sols et de la végétation application à la télédétection. In: **Télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation**. Toulouse: Centre National d'Etudes Spatiales. 1988. cap. 7, p. 637-728.

GUYOT, G. **Signatures spectrales des surfaces naturelles**. Caen: Paradigme, 1989. 178p.

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

HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, Inc. 1978. cap 5, p. 227-289.

IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Estatísticas de produção: Previsão de safra**. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2001.

JACKSON, R. D.; MORAN, M. S.; SLATER, P. N. et al. Field calibration of reference reflectance panels. **Remote Sens. Environ.**, v. 22, p. 145-158, 1987.

KARLEN, D. L.; WHITNEY, D. A. Dry matter accumulation, mineral concentrations, and nutrient distribution in winter wheat. **Agron. J.**, v. 72, p. 281-288, 1980.

KIDWELL, K. B. **NOAA polar orbiter data. User's guide. (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13, and NOAA-14)**. NOAA/NESDIS, 1998. Disponível em: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/index.htm>>. Acesso em: 06 nov. 2000.

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

LEAMER, R. W.; NORIEGA, J. R.; GERBERMANN, A. H. Reflectance of wheat cultivars as related to physiological growth stages. **Agron. J.**, v. 72, p. 1029-1032, 1980.

LONDON, J.; BOJKOV, R. J.; OLTMANS, S.; KELLEY, J. I. **Atlas of the global distribution of total ozone July 1957 - June 1967**. NCAR, 1976. (Technical Note, 113).

MAAS, S. J. Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed reflectance. **Agron. J.**, v. 90, p. 384-388, 1998.

MANDEL, J. **The statistical analysis of experimental data**. New York: Dover Publications Inc., 1984. 410 p.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística geral**. v. 2. São Paulo: Editora Atlas S. A., 1993. 259 p.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **Int. J. Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura brasileira em números**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2001.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold, 1990. 290p.

MOTA, F. S. (Ed.). **Agrometeorologia do trigo no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. 122 p.

MYERS, V. I. Remote sensing applications in agriculture. In: COLWELL, R. N. (Ed.). **Manual of remote sensing**. 2. ed. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1983. v. 2, cap. 33, p. 2111-2228.

NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J. et al. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington: National Bureau of Standards, 1977. 52p.

PAGE, M. B.; SMALLEY, J. L.; TALIBUDEEN, O. The growth and nutrient uptake of winter wheat. **Plant and Soil**, v. 49, p. 149-160, 1977.

PERRY, C. R. JR.; LAUTENSCHLAGER, L. F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sens. Environ.**, v. 14, p. 169-182, 1984.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. **Int. J. Remote Sensing**, v. 12, p. 1313-1330, 1991.

QUARMBY, N. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; SETTE, J. J. et al. Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. **Int. J. Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 415-425, 1992.

QUARMBY, N. A.; MILNES, M.; HINDLE, T. L. et al. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. **Int. J. Remote Sensing**, v. 14, n. 2, p. 199-210, 1993.

RAO, C. R. N.; CHEN, J. **Revised post-launch calibration of channels 1 and 2 of the Advanced Very High Resolution Radiometer on board the NOAA-14 spacecraft**. Revisado em 31 dez. 1999. Disponível em: <<http://psbsgi1.nesdis.noaa.gov:8080/EBB/ml/niccal1.html>>. Acesso em: 03 out. 2000.

RONDEAUX, G. Vegetation monitoring by remote sensing: a review of biophysical indices. **Photo-Interprétation**, v. 33, n. 1995/3, p. 197-216, 1995.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sens. Environ.**, v. 31, p. 53-63, 1990.

SILVA, D. B.; GUERRA, A. F.; REIN, T. A. et al. **Trigo para o abastecimento familiar; do plantio à mesa**. Brasília: Embrapa - SPI; Planaltina: Embrapa - CPAC, 1996. 176p.

SOARES SOBRINHO, J.; SOUZA, M. A. Origem, descrição botânica e desenvolvimento do trigo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 97, p. 9-13, 1983.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry: the principles and practice of statistics in biological research**. 3. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1995. 887p.

STSC – STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION. **STATGRAPHICS user's guide**. 1987.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P. et al. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. **Int. J. Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p.659-668, 1990.

TEIXEIRA, J. R. J.; DÁVALOS, E. D. **Cadeias produtivas do Estado de Santa Catarina: Trigo**. Florianópolis: Epagri, 1998. 30p. (Epagri. Boletim Técnico, 102).

TOWNSHEND, J. R. G.; TUCKER, C. J. Objective assessment of Advanced Very High Resolution Radiometer data for land cover mapping. **Int. J. Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 497-504, 1984.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sens. Environ.**, v. 8, p. 127-150, 1979.

TUCKER, C. J.; HOLBEN, B. N.; ELGIN, J. H. JR. et al. Relationship of spectral data to grain yield variation. **Photogram. Engr. and Remote Sensing**, v. 46, n. 5, p. 657-666, 1980.

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.

WALDREN, R. P.; FLOWERDAY, A. D. Growth stages and distribution of dry matter, N, P, and K in winter wheat. **Agron. J.**, v. 71, p. 391-397, 1979.

WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. **Adv. Agron.**, v. 4, p. 101-145, 1952.

WYLIE, B. K.; HARRINGTON, J. A. JR.; PRINCE, S. D. et al. Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986-1988. **Int. J. Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1281-1300, 1991.

ZULLO, J. JR. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 1994. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1994.

ZULLO, J. JR.; ARRUDA, F. B. **Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais**. Campinas, Instituto Agronômico, 1986. (IAC. Boletim Técnico, 113).

ZULLO, J. JR.; GU, X.; GUYOT, G. et al. Estimativa do conteúdo de vapor d'água a partir da radiação solar direta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador, BA. **Anais do ...** São Paulo: INPE e SELPER, 1996. (CD-ROM).

ZULLO, J. JR.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O.; ASSAD, E. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) de sequeiro no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, Florianópolis, SC. **Anais do ...** Florianópolis: SBA, 1999. (CD-ROM).