

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE IMAGENS DE ALTA E MÉDIA RESOLUÇÃO
ESPACIAL NO ESTUDO DE ÁREAS CAFFEEIRAS**

GLAUCIA MIRANDA RAMIREZ

CAMPINAS
FEVEREIRO 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE IMAGENS DE ALTA E MÉDIA RESOLUÇÃO
ESPACIAL NO ESTUDO DE ÁREAS CAFEEIRAS**

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

GLAUCIA MIRANDA RAMIREZ
Orientador: Prof.Dr. Jurandir Zullo Junior

CAMPINAS
FEVEREIRO 2009

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

R145u Ramirez, Glaucia Miranda
Uso de imagens de alta e média resolução espacial no
estudo de áreas cafeeiras / Glaucia Miranda Ramirez. --
Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Jurandir Zullo Junior.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Café - Sensoriamento remoto. 2. LANDSAT
(Satelites). 3. Sensoriamento remoto. 4. Processamento
de imagens. I. Zullo Junior, Jurandir. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Use of high and medium spatial resolution images in the
study of coffee areas

Palavras-chave em Inglês: Quickbird, Landsat/TM, Remote sensing, Coffee,
Processing of images

Área de concentração: Planejamento e desenvolvimento rural sustentável

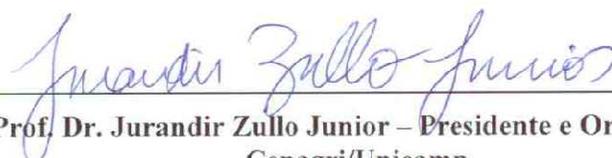
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Fábio Ricardo Marin, Giampaolo Queiroz Pellegrino,
Maria Angela Fagnani, Luiz Henrique Antunes
Rodrigues

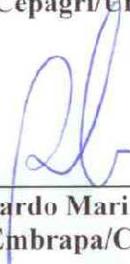
Data da defesa: 18/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

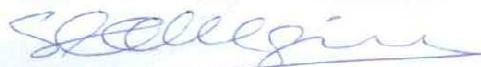
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Gláucia Miranda Ramirez**, aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de fevereiro de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior – Presidente e Orientador
Cepagri/Unicamp**



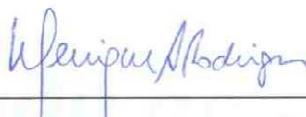
**Dr. Fábio Ricardo Marin – Membro Titular
Embrapa/CNPTIA**



**Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino – Membro Titular
Embrapa/CNPTIA**



**Prof.^a. Dr.^a. Maria Angela Fagnani – Membro Titular
Feagri/Unicamp**



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

Aos meus pais, *Nelson e Aparecida*,
pelo exemplo de vida, dedicação e
incentivo desde os primeiros dias de
escola.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro de quatro anos de bolsa de doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior pela oportunidade, ensinamento, incentivo e tempo a mim dedicado durante a realização deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, Dr. Fábio Ricardo Marin, Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino, Dra. Maria Ângela Fagnani e Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues, pelas críticas e sugestões que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

À Coordenadoria de Pós-graduação, Ana Paula Montagner, Alexandre D'Ávila e Marta Vechi, pelo apoio administrativo e atenção oferecida.

Ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni, pelas contribuições ao trabalho, pela imagem cedida e, principalmente, pela oportunidade de aprendizado durante sua estada no Cepagri e as campanhas em Barreiras.

Aos doutores Eduardo Delgado Assad e Hilton Silveira Pinto pelo apoio durante todo desenvolvimento do trabalho.

A todo pessoal do CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) pelo carinho e acolhimento: Claudir, Edilene, Lorena (e pela ajuda na tabulação dos dados), Joaquim, Rubens, Jacqueline, Michele, Priscila, Marina, Celso e Daniel. Ao Gustavo Coral pelo apoio e noites divididas no prédio do Cepagri.

Às amigas, Renata Ribeiro, Daniela Oliveira, Cristina Nascimento e Ana Ávila pelo estímulo, carinho e risadas compartilhadas.

À Vanilde Ferreira e Ângela Iaffe, duas amigas muito especiais que me ajudaram durante a realização dos trabalhos de campo.

Meus agradecimentos especiais: à minha querida amiga Rojane Kleteke e ao Ernesto Hamahusa que me acolheram fisicamente e emocionalmente no processo final deste trabalho e, ao meu amigo Júlio César Esquerdo pelo estímulo, apoio técnico e principalmente emocional durante todo nosso convívio.

E, principalmente, à minha filha Vitória e ao meu marido Eduardo pelo amor incondicional e compreensão durante minhas ausências. À minha irmã Alessandra, ao meu cunhado Leonardo e às minhas tias, Lúcia e Terezinha, que sempre apoiaram e acreditaram no meu projeto de vida.

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para o êxito deste trabalho, meu eterno agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A cultura cafeeira no Brasil.....	4
2.2. Aspectos gerais da cultura do café (<i>Coffea arabica</i>).....	5
2.3. Sensoriamento remoto orbital.....	8
2.3.1. Sistemas sensores utilizados em aplicações agrícolas.....	10
2.3.2. Processamento digital de imagens de satélite.....	15
2.3.2.1. Análise por Componentes Principais (ACP).....	17
2.3.2.2. Índices de vegetação.....	19
2.4. Sensoriamento remoto orbital no estudo de culturas perenes	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1. Área de Estudo	27
3.2. Imagens.....	28
3.3. Dados de campo	33

3.4. Metodologia.....	40
3.4.1. Correção atmosférica e transformação dos valores digitais para valores de refletância .	41
3.4.2. Coleta dos valores digitais das imagens referentes aos talhões levantados em campo ...	43
3.4.4. Análise Estatística	46
3.4.4.1. Análise de Correlação.....	46
3.4.4.2. Teste de Tukey.....	46
3.4.4.3. Análise Fatorial por Componentes Principais	47
3.4.4.4. Análise de Regressão.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1. Resultados das Análises de Correlação	54
4.2. Resultados do teste de Tukey para os Índices de Vegetação.....	59
4.3. Resultado da Análise Fatorial por Componentes Principais	69
4.3.1. Cálculo dos fatores para o satélite QUICKBIRD.....	69
4.3.1.1. Análise de Agrupamento para os dados do satélite QUICKBIRD	72
4.3.2. Cálculo dos fatores para o satélite TM/LANDSAT	76
4.3.2.1. Análise de Agrupamento para os dados do satélite TM/LANDSAT	79
4.4. Resultado das Análises de Regressão	82
4.4.1. Avaliação dos modelos gerados a partir das análises de regressão	86
4.4.1.1. Avaliação dos modelos gerados para o índice de área foliar (IAF).....	86
4.4.1.2. Avaliação dos modelos gerados para a quantidade de biomassa.....	91

4.4.1.3. Avaliação dos modelos gerados para a estimativa da altura	97
5. CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemática das fases fenológicas do cafeeiro nas condições climáticas tropicais do Brasil (Fonte: CAMARGO e CAMARGO, 2001).	7
Figura 2: Curvas espectrais de vegetação verde, solo e vegetação não fotossinteticamente ativa, correspondentes a espectros de laboratório (Adaptada de ROBERTS et al., 1997).	9
Figura 3: Fatores que influenciam a resposta espectral de dosséis agrícolas (Fonte: Adaptada de EPIPHANIO et al., 1994).	23
Figura 4: Localização da área de estudo, entre os municípios de Ribeirão Corrente (1), Franca (2) e Cristais Paulista (3).	28
Figura 5: Ângulos solar e de visada do satélite QUICKBIRD no momento de aquisição da imagem, em 05/02/2006, onde $\beta_1=83,2^\circ$, $\beta_2=66,5^\circ$, $\alpha_1=280,6^\circ$ e $\alpha_2=83,2^\circ$	29
Figura 6: Ângulos solar e de visada do satélite TM/LANDSAT-5 no momento de aquisição da imagem, em 24/01/2006, onde $\beta=57,58^\circ$ e $\alpha=94,74^\circ$	30
Figura 7: Imagem do satélite LANDSAT/TM (RGB-453) mostrando a área de estudo com resolução espacial de 30m.	31
Figura 8: Imagem do satélite QUICKBIRD (RGB-423) com resolução espacial de 2,4m mostrando a área de estudo.	32
Figura 9: Esquema mostrando a determinação da medição dos espaçamentos entre linhas e na linha de plantio.	33
Figura 10: Foto mostrando talhão com plantio em renque.	34
Figura 11: Foto mostrando plantio novo (café em formação), em que ainda não ocorreu a formação em renque.	34

Figura 12: Esquema mostrando a medida utilizada para o cálculo do diâmetro das plantas. ...	35
Figura 13: Localização dos talhões selecionados para o estudo.....	37
Figura 14: Localização dos talhões selecionados para o estudo.....	38
Figura 15: Fluxograma de atividades.	40
Figura 16: Imagem do satélite QUICKBIRD (Banda 4) mostrando os talhões selecionados para validação das equações obtidas através das análises de regressão.	52
Figura 17: Gráfico com os autovalores e a ordem dos fatores.	70
Figura 18: Gráfico de dispersão dos fatores	72
Figura 19: Gráfico apresentando FATOR 1 vs FATOR 2 com o resultado dos agrupamentos.	74
Figura 20: <i>Dendograma</i> (árvore) de agrupamento dos dados do satélite QUICKBIRD.	76
Figura 21: Gráfico com os autovalores e a ordem dos fatores.	77
Figura 22: Gráfico de dispersão dos fatores	78
Figura 23: <i>Dendograma</i> do agrupamento do satélite TM/LANDSAT	80
Figura 24: Gráfico apresentando FATOR 1 vs FATOR 2 com o resultado dos agrupamentos	81
Figura 25: Gráficos mostrando a dispersão dos dados da biomassa e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 e 2 do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD.....	84
Figura 26: Gráficos mostrando a dispersão dos dados do IAF e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 e 2 do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD.....	85
Figura 27: Gráficos mostrando a dispersão dos dados de altura e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 do LANDSAT e banda 2 do QUICKBIRD.....	85

Figura 28: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença entre eles, para a banda 1 do TM/LANDSAT.....	87
Figura 29: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do TM/LANDSAT.	88
Figura 30: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 1 do QUICKBIRD.....	89
Figura 31: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do QUICKBIRD.....	91
Figura 32: Gráfico com valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda TM1 do LANDSAT.	92
Figura 33: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda TM2 do LANDSAT.	94
Figura 34: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda 1 do QUICKBIRD.	95
Figura 35: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do QUICKBIRD.	96
Figura 36: Gráfico com os valores das alturas medidas, calculadas e a diferença existente entre elas, para a banda TM1 do LANDSAT.	98
Figura 37: Gráfico com os valores das alturas medidas, calculadas e da diferença existente entre elas, para a banda 2 do QUICKBIRD.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características das bandas do TM/LANDSAT, faixas espectrais (F.E.), resolução espacial (R.E.) e aplicações principais.	11
Tabela 2: Características das bandas do QUICKBIRD, faixas espectrais (F.E.), resolução espacial (R.E.) e aplicações principais.	13
Tabela 3: Índices de vegetação utilizados no trabalho.	20
Tabela 4: Descrição dos valores médios dos parâmetros biofísicos nos trinta talhões amostrados em campo.	39
Tabela 5: Descrição dos dados obtidos a partir do MODIS para entrada no SCORADIS.....	42
Tabela 6: Dados de precipitação e temperatura da estação meteorológica de Franca (SP), com destaque para as datas de aquisição das imagens do TM/LANDSAT e QUICKBIRD, respectivamente.	42
Tabela 7: Códigos (nomes) dos 25 talhões utilizados nas análises de regressão	50
Tabela 8: Equações utilizadas na linearização das regressões empregadas no programa AJUSTE.....	51
Tabela 9: Talhões separados para avaliação das equações de regressão.	53
Tabela 10: Tabela com valores médios de refletância real das bandas espectrais do TM/LANDSAT e índices de vegetação calculados a partir delas.	54
Tabela 11: Tabela com valores médios de refletância real das bandas espectrais do QUICKBIRD e índices de vegetação calculados a partir delas.....	55
Tabela 12: Valores de correlação significativos (para $\alpha=5\%$) entre as bandas espectrais, índices de vegetação dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD e parâmetros biofísicos dos plantios de café.	56

Tabela 13: Classificação dos valores dos coeficientes de correlação linear.....	56
Tabela 14: Valores de correlação ($\alpha=5\%$) entre as bandas 4 (infravermelho próximo) dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD e quatro níveis distintos para a %COB...58	58
Tabela 15: Classes de agrupamento dos dados biofísicos que apresentaram maior correlação com os índices de vegetação.....	59
Tabela 16: Pares de talhões (55), com características semelhantes em campo, representados pelo símbolo (*), de acordo com agrupamento realizado.....	61
Tabela 17: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem do índice de vegetação NDVI do satélite TM/LANDSAT.	62
Tabela 18: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação SAVI do satélite TM/LANDSAT.....	63
Tabela 19: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação GVI do satélite LANDSAT/TM.	64
Tabela 20: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação RVI do satélite TM/LANDSAT.	65
Tabela 21: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação NDVI do satélite QUICKBIRD.....	66
Tabela 22: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação RVI do satélite QUICKBIRD.....	67
Tabela 23: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação GVI do satélite QUICKBIRD.....	67
Tabela 24: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação SAVI do satélite QUICKBIRD.	68

Tabela 25: Coeficientes de Correlação de Pearson (P-Valor)	70
Tabela 26: Correlação entre as bandas do satélite QUICKBIRD e os fatores obtidos pela análise fatorial, com destaque para as maiores correlações.....	71
Tabela 27: Estatísticas descritivas para os escores dos fatores (%).	72
Tabela 28: Histórico de agrupamento–similaridades, em destaque para etapa de mudança.	73
Tabela 29: Coeficientes de Correlação de Pearson (P-Valor).	76
Tabela 30: Correlação entre as bandas do satélite TM/LANDSAT e os fatores obtidos pela análise fatorial, com destaque para as maiores correlações.....	78
Tabela 31: Estatísticas descritivas para os escores dos fatores (%), para a imagem TM/LANDSAT.	79
Tabela 32: Histórico de agrupamento–similaridades, em destaque a etapa de mudança.	79
Tabela 33: Equações de regressão múltipla e seus respectivos R^2 (para $\alpha=5\%$).....	82
Tabela 34: Equações geradas pelo programa Ajuste e seus respectivos R^2 (para $\alpha=5\%$) para os parâmetros Biomassa, IAF e Altura.	83
Tabela 35: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM1 do LANDSAT.....	86
Tabela 36: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM2 do LANDSAT	87
Tabela 37: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 1 do QUICKBIRD.	89
Tabela 38: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão dos dados banda 2 do QUICKBIRD.....	90

Tabela 39: Valores do parâmetro Biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM1 do LANDSAT.92

Tabela 40: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM2 do LANDSAT.93

Tabela 41: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 1 do QUICKBIRD.....94

Tabela 42: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 2 do QUICKBIRD.....96

Tabela 43: Valores do parâmetro altura (ALT MED), medido em campo, e calculados (ALT CAL), a partir da equação de regressão dos dados banda TM1 do LANDSAT.....97

Tabela 44: Valores do parâmetro altura medido em campo (ALT MED) e calculados (ALT CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 2 do QUICKBIRD.....98

RESUMO

O café sempre foi sinônimo de progresso e contribuiu de maneira decisiva para a industrialização do Brasil sendo, ainda hoje, um dos seus produtos agrícolas mais importantes. A obtenção de informações precisas, em tempo hábil e com baixo custo, sobre a extensão e o rendimento da cultura, são instrumentos valiosos para um planejamento adequado da cultura no país. Dentre as técnicas que podem ser utilizadas, neste caso, o sensoriamento remoto é uma das que possuem um grande potencial de aplicação, principalmente considerando o aumento da disponibilidade de imagens de média resolução espacial e o advento das imagens de alta resolução espacial. Sendo assim, o objetivo geral do trabalho foi compreender as interações existentes entre os parâmetros biofísicos de cafezais e a resposta espectral registrada nas bandas de imagens dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD adquiridas em 24/01/2006 e 05/02/2006, respectivamente. Foram utilizados 30 talhões pertencentes a seis propriedades agrícolas, localizadas na região da Alta Mogiana, em São Paulo, entre os municípios de Ribeirão Corrente, Franca e Cristais Paulista. Os parâmetros biofísicos da cultura determinados a partir de dados de campo foram o espaçamento entre linhas e plantas, altura, IAF, diâmetro da copa, porcentagem de cobertura vegetal, rugosidade, variedade e biomassa. Foram utilizados valores de refletância real das bandas espectrais dos dois satélites e quatro índices de vegetação (NDVI, GVI, SAVI e RVI). Foi aplicado o teste de Tukey e realizadas análises de correlação, regressão e fatorial por componentes principais, utilizando os dados biofísicos e remotos disponíveis. Alguns parâmetros biofísicos não puderam ser estimados, mesmo com a melhoria da resolução espacial. Outros foram estimados (IAF, Biomassa e Altura) mesmo utilizando dados remotos de média resolução espacial. A análise de componentes principais permitiu separar plantios em produção, de áreas em formação, para as duas imagens, sendo que a associação dos parâmetros biofísicos “porcentagem de cobertura” e “densidade populacional” foi a principal responsável por estes resultados. Estes agrupamentos podem ser de grande utilidade na classificação automática de imagens. Apesar do avanço tecnológico proporcionado pelas imagens de alta resolução espacial, elas não se mostraram superiores a ponto de substituírem, mas complementarem as informações fornecidas pelas imagens de média resolução.

Palavras-chave: QUICKBIRD, TM/LANDSAT, sensoriamento remoto, café

ABSTRACT

Coffee has been synonymous of progress and has strongly contributed to the industrialization of Brazil. Nowadays, the coffee is still one of the most important Brazilian agricultural products. Precise, on time and low cost information about coffee area and yield are valuable tools for the crop planning in the country. For this purpose, remote sensing techniques show a great potential to be applied, especially considering the increased availability of medium spatial resolution images and the coming of high spatial resolution imagery. Thus, the main objective of this study was to understand the interactions between the biophysical parameters of coffee crops and the spectral response measured by the TM/LANDSAT and QUICKBIRD satellites spectral bands, acquired on 24/01/2006 and 05/02/2006, respectively. We used 30 coffee areas in six farms, located in the region of Alta Mogiana, in the State of São Paulo, between the municipalities Ribeirão Corrente, Franca e Cristais Paulista. The biophysical crop parameters determined from the field survey were the row and plants spacing, height, LAI, crown diameter, percentage of vegetation cover, roughness, variety and biomass. We used real values of reflectance from the spectral bands of both satellites and four vegetation indexes (NDVI, GVI, SAVI and RVI). Tukey test was applied and it was carried out the analysis of correlation, regression and factorial analysis through principal components by using the available remote and biophysical data. Some biophysical parameters could not be estimated, even with improved spatial resolution. Others were estimated (LAI, biomass and height), even using remote data of medium spatial resolution. The analysis of the main components allowed to separate crop lands in production and in formation in the two images. The combination of biophysical parameters “percentage of coverage” and “density” was the main responsible for these results. This technique can be very useful in the automatic classification of images. Despite the technological advances provided by the images of high spatial resolution, these images may not replace, but complement the information provided by medium-resolution images.

Keywords: QUICKBIRD, TM/LANDSAT, remote sensing, coffee.

1. INTRODUÇÃO

O café sempre foi sinônimo de progresso e contribuiu de maneira decisiva para a industrialização do país sendo que, ainda hoje, é um dos seus produtos agrícolas mais importantes. O Brasil é o maior produtor mundial de café, com 28% da produção, seguido pela Colômbia, que contribui com 14%. Os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo são os maiores produtores brasileiros, responsáveis, respectivamente, por 50%, 22% e 10% da produção nacional (CONAB, 2008). Metade dos empregos gerados pelo café no Brasil encontra-se em Minas Gerais, movimentando, anualmente, US\$ 800 milhões no estado, que equivale a 18% do PIB agropecuário mineiro. O Espírito Santo é o segundo produtor brasileiro de café, possuindo mais de 500 mil hectares cultivados, diferenciando-se dos demais estados pela produção da variedade robusta, mais resistente a climas quentes e secos e que, atualmente, representa 60% da produção do estado. Em São Paulo, as plantações concentram-se na região da Mogiana (ao norte, na divisa com Minas Gerais), sendo um estado de grande importância para o agronegócio do café também por causa de sua infra-estrutura portuária, que é responsável pela maior parte do escoamento da produção nacional, e por possuir o maior parque industrial de café do país.

Tendo em vista que a produção de café é um segmento importante da economia brasileira, a obtenção de informações precisas, em tempo hábil e com baixo custo, sobre a extensão e o rendimento da cultura, são instrumentos valiosos que podem viabilizar um planejamento adequado pela integração correta entre o mercado e a produção (LIU e LIU, 1988). No Brasil, a obtenção de informações oficiais referentes à cultura cafeeira (tais como área plantada, quantidade produzida e área colhida, por exemplo) é realizada pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) e pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) que utilizam informações municipais obtidas através da aplicação de questionários padrões a produtores, cooperativas e representantes de órgãos públicos e privados. Segundo IPPOLITI-RAMILO et al. (1999) e COLLARES et al. (1993), os dados coletados seguindo

esta metodologia são bastante suscetíveis a erros de análise humana, além de dificultar a estimativa da precisão dos dados e resultados obtidos. Outro problema relacionado à aquisição de dados da cafeicultura brasileira, segundo DUARTE e BRITO (2007), é o alto custo financeiro e de pessoal demandados pela metodologia utilizada atualmente. Por isso é necessária a ampliação de pesquisas que permitam identificar, quantificar e qualificar as áreas com plantios de café de maneira mais rápida, precisa e com custos menores.

Dentre as técnicas que podem ser consideradas neste contexto, o sensoriamento remoto é uma das que possuem um grande potencial de aplicação, pois representa, segundo EIPHANIO et al. (1994) e DALLEMAND et al. (1988), um avanço significativo no levantamento de dados, no monitoramento e no planejamento agrícolas. Isso é devido, entre outros fatores, à ampliação do acesso aos dados de sensores remotos, à disponibilidade de equipamentos para o processamento dos dados que permitem estudar os diversos sistemas agrícolas e às dimensões continentais do país. Ressalta-se que, no Brasil, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto têm tido um aumento significativo ao longo do tempo, nos mais diversos campos do conhecimento, de tal modo que o país pode ser considerado um dos maiores usuários mundiais de imagens e dados remotos.

No caso específico da cafeicultura, trabalhos como os de BERTOLDO et al. (2003), ALVES e LACERDA (2003), MOREIRA et al. (2003) e RAMIREZ et al. (2006) ilustram o potencial da aplicação do sensoriamento remoto no planejamento e desenvolvimento do setor. Apesar da importância destes e de outros trabalhos realizados, principalmente no Brasil, ainda são necessárias mais pesquisas que permitam fazer com que o sensoriamento remoto seja utilizado de maneira efetiva no levantamento, mapeamento e monitoramento de áreas cafeeiras, servindo de apoio aos métodos operacionais empregados atualmente. O conhecimento da correlação entre fatores biofísicos da cultura e sua resposta espectral e da contribuição efetiva das imagens de alta resolução espacial para o cadastro da cultura são exemplos de desenvolvimentos que podem auxiliar os métodos atuais de previsão e monitoramento de safras.

Desse modo, considerando a importância do café para o Brasil, a importância da previsão de safras para a cafeicultura e o estudo atual da tecnologia de sensoriamento remoto, principalmente o advento das imagens de alta resolução espacial, a hipótese do trabalho é que “a utilização de imagens de alta e média resolução espacial permite obter características

biofísicas dos cafezais, a serem empregadas efetivamente no apoio aos métodos operacionais utilizados atualmente no acompanhamento das safras da cultura no país”.

O objetivo geral do trabalho foi compreender as interações existentes entre os parâmetros biofísicos de cafezais e a resposta espectral registrada nas bandas de satélites de alta (QUICKBIRD) e média (TM/LANDSAT) resolução espacial.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a capacidade de diferenciação das características biofísicas de plantios de café, a partir de índices de vegetação e refletância real, calculados com imagens de alta (QUICKBIRD) e média (TM/LANDSAT) resolução espacial;

- Propor modelos de estimativa de parâmetros biofísicos do café a partir de valores de refletância real e índices de vegetação calculados com base em imagens de média (TM/LANDSAT) e alta (QUICKBIRD) resolução espacial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura cafeeira no Brasil

O café é originário da Etiópia, antiga Abissínia, mas a Arábia foi responsável por sua difusão e propagação. Até o século XVII, somente os árabes produziam café, devido a um controle total existente sobre o cultivo e preparo da bebida, tornando-se um dos produtos de maior importância econômica desse povo. Na Europa, os holandeses foram os que conseguiram as primeiras mudas da planta. Eles a cultivaram em estufas e, a partir delas, iniciaram, em 1699, plantios experimentais em Java. A experiência trouxe lucro, encorajando outros países a fazerem o mesmo em suas colônias. O crescente mercado consumidor europeu propiciou a expansão dos plantios de café nos países africanos e a sua chegada ao Novo Mundo. Pelas mãos dos colonizadores europeus, o café chegou ao Suriname, São Domingos, Cuba, Porto Rico e nas Guianas. Entrou no Brasil em 1727 pelo Pará, trazido da Guiana Francesa. Da região Norte, o café foi para o Nordeste, até chegar, em 1773, ao Rio de Janeiro. Expandiu-se pela Serra do Mar, atingindo, em 1825, o Vale do Paraíba, alcançando os estados de São Paulo e Minas Gerais (JORNAL DO CAFÉ, 2008).

No país, o desenvolvimento do café se deu na época da Independência. As culturas do açúcar e do algodão estavam em crise e os fazendeiros precisavam encontrar outro produto de fácil colocação no mercado internacional. Além disso, a decadência da mineração disponibilizou mão-de-obra e recursos financeiros que podiam ser aplicados em atividades mais lucrativas. Em 1830, o café transformou-se no principal produto de exportação do Brasil, ultrapassando o algodão e o açúcar. Em 1860, o Brasil tornou-se o maior produtor e exportador mundial de café, sendo que, no início do século 20, já representava 75% das exportações brasileiras. Com a recessão econômica iniciada em 1929, devido à queda drástica de ações na bolsa de Nova Iorque, e que persistiu ao longo da década de 30, houve uma

derrocada das lavouras e a queima de 80 milhões de sacas (CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ, 2008).

Em 1931, foi criado o Conselho Nacional do Café (CNC) para fortalecer a política da cultura no país. Outros institutos surgiram desde então, entre eles, o Instituto Brasileiro do Café (IBC), extinto em 1989. Hoje, o setor é regido pelo Conselho Deliberativo da Política do Café (CDPC), criado em 1996, pelas entidades do setor, sendo vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (SAES, 1995).

No estado de São Paulo, o agronegócio do café movimenta cerca de cinco bilhões de reais, anualmente, e gera 500 mil empregos, que vão desde a produção de insumos para a cultura até o consumo do tradicional cafezinho, passando pelas etapas intermediárias, com seus efeitos multiplicadores, representados pelas atividades ligadas à agroindústria e ao setor de serviços (HEMERLY, 2000). As principais áreas de cultivo de café no estado estão localizadas nas regiões da Mogiana e Alta Paulista.

A Alta Mogiana é uma das regiões produtoras de café mais tradicionais do estado de São Paulo. As cidades da região se desenvolveram a partir da cultura do café, que foi introduzida há, aproximadamente, 200 anos. Atualmente, o produto ainda exerce grande influência na economia, pois são mais de 1.500 cafeicultores, distribuídos em 23 municípios, que produzem 1.000.000 sacas/ano, em média. Com uma altitude que varia de 800 a 1.000 metros, a região produz café da espécie arábica, sendo que as variedades mais cultivadas são Catuaí e Mundo Novo. A Mogiana é uma das regiões do Brasil que produz cafés finos, conhecidos como cafés de bebida mole.

2.2. Aspectos gerais da cultura do café (*Coffea arabica*)

O café é uma planta perene com mais de cem espécies descritas, podendo variar de pequenos arbustos a árvores altas. Pertencente à família Rubiaceae, possui duas espécies principais mais cultivadas, o *Coffea arabica* (café arábica) e o *Coffea canephora* (café robusta), que possuem maior valor econômico no mercado internacional. Dentre as principais variedades de *Coffea arabica* cultivadas no Brasil, destacam-se a Mundo Novo e a Catuaí (com as linhagens Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo). Atualmente, novas variedades têm sido utilizadas (Icatu, Iapar, Tupi, Obatã, Catuaí Rubi, Catucaí, entre outras) devido,

principalmente, às suas características físicas e de resistência às pragas e doenças (OLIVEIRA, 2007).

O cafeeiro pode vegetar em uma área geográfica extensa compreendida, em sua maior parte, nos trópicos, abrangendo uma variação ampla de clima e solo. Porém, sua produção econômica se restringe a uma área bem menor, dentro dos limites em que os fatores ecológicos são mais favoráveis. O cafeeiro é adaptado a clima ameno, subtropical, com temperatura média de 18°C a 22°C e deficiência hídrica inferior a 150mm anuais. As condições mais apropriadas de cultivo da cultura, para o estado de São Paulo, são encontradas a 400m de altitude, ao sul do paralelo 22°, e a 500m ao norte deste paralelo (FAZUOLI, 1990).

A cafeicultura comercial do Brasil apresenta o florescimento na primavera, a frutificação no verão, a maturação no outono e a colheita no inverno. Nas principais áreas cafeeiras, o clima, chuvoso na primavera/verão, seguido de uma estação relativamente seca no outono/inverno, favorece bastante a frutificação e a produção do cafeeiro. As fases críticas, como a formação do "chumbinho" e a granação, são beneficiadas pelas chuvas da primavera e do verão, e as de maturação e colheita, pelo outono e inverno relativamente secos (ALFONSI, 2000).

Para MATIELLO (1991), no período de vegetação e frutificação, o cafeeiro é exigente em água sendo que a exigência é menor na fase de colheita permitindo, inclusive, a ocorrência de pequena deficiência hídrica, sem grandes prejuízos para a planta. Períodos curtos de seca são importantes para o crescimento das raízes, maturação dos ramos (formados na estação chuvosa anterior) e, principalmente, para a diferenciação floral e maturação dos frutos. Ainda, segundo o mesmo autor, uma pluviosidade anual de 1.200mm pode ser considerada adequada para o bom desenvolvimento do café arábica. Quando a deficiência hídrica for maior que 150mm, e as temperaturas médias forem superiores a 23°C, as áreas destinadas ao plantio enquadradas neste perfil são consideradas inaptas, uma vez que restringem a frutificação, resultando em produtividade baixa. PINTO et al. (2001), SEDYAMA et al. (2001), CARAMORI et al. (2001) e ASSAD et al. (2001) descrevem a metodologia e os resultados do zoneamento agrícola do café arábica para os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Goiás, respectivamente.

Segundo CAMARGO e CAMARGO (2001), o cafeeiro necessita de dois anos para atingir o estágio fenológico de frutificação, fator que o difere da maioria das plantas agricultáveis, que completam seu ciclo produtivo em um ano, conforme ilustrado na Figura 1.

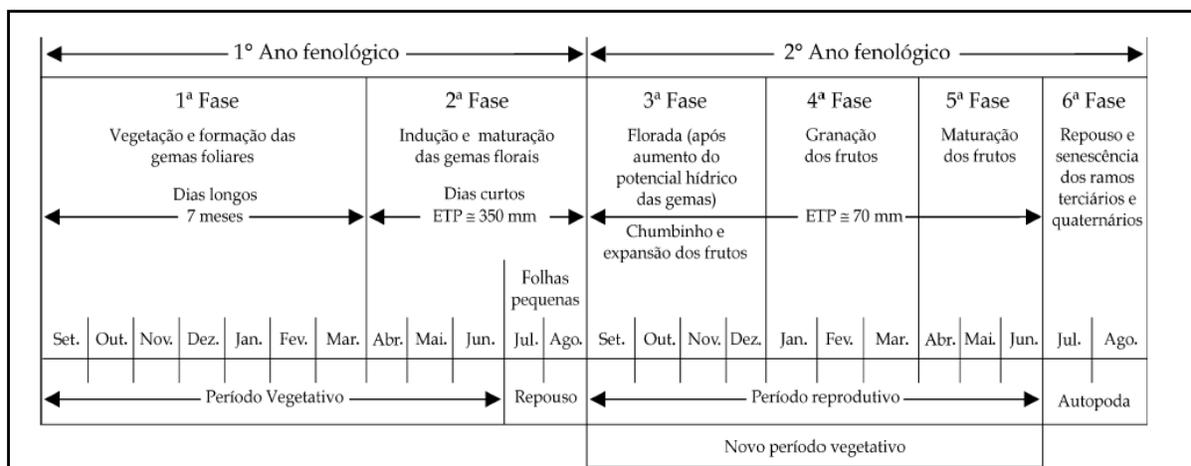


Figura 1: Esquematização das fases fenológicas do cafeeiro nas condições climáticas tropicais do Brasil (Fonte: CAMARGO e CAMARGO, 2001).

Os espaçamentos dos plantios utilizados na cafeicultura variam em função do manejo, da cultivar e da topografia do terreno. Os espaçamentos tradicionais de plantio em quadrado variavam de 3,5m a 4,0m entre linhas e 3,5m a 4,0m entre covas, até a década de 60. A partir da década de 80, passou-se a implantar lavouras com espaçamentos mais adensados, melhorando-se o estande através do aumento do número de plantas por hectare. Nos anos 90, o sistema adensado obteve um grande incremento, embora, ainda em nível nacional, não ocupe um espaço significativo, representado cerca de 12% da área nacional. Os sistemas tradicional e em renque ocupam 50% e 28%, respectivamente. Os plantios de café podem ser caracterizados de acordo com a densidade de plantas sendo que os cultivos tradicionais têm até 3.000plantas/ha, os adensados entre 3.000plantas/ha e 7.000 plantas/ha, e, os superadensados, mais de 7.000plantas/ha (THOMAZIELLO, 2008).

Os solos mais adequados ao cultivo do cafeeiro são os profundos, porosos e bem drenados, com uma estrutura granular de tamanho médio, moderadamente desenvolvido, com textura média, não sendo recomendados solos com teor de argila menor que 20% e, quando muito argilosos, devem apresentar estrutura e porosidade favorável à boa infiltração da água

(SEDIYAMA et al., 2001). Em igualdade de condições, deve-se dar preferência aos solos mais férteis. Entretanto, como a pobreza do solo pode ser corrigida por adubação, pode-se tornar economicamente mais vantajoso cultivar os cafeeiros em um solo mais pobre, porém com topografia e propriedades físicas melhores e maior facilidade de transporte. Neste caso, o maior gasto com fertilizantes poderá ser compensado pela economia resultante dos gastos menores com práticas conservacionistas, facilidades nos tratos culturais e transporte.

2.3. Sensoriamento remoto orbital

Técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo utilizadas na caracterização espectral da cobertura vegetal em diversos níveis de trabalho, desde o estudo de dosséis até de folhas isoladas. Assim, a coleta de dados remotos pode ser feita nos seguintes níveis: orbital, aéreo, de campo e de laboratório.

O estudo do comportamento espectral de uma folha isolada é fundamental para o entendimento da refletância do dossel de uma cultura (BAUER et al., 1981). Para a caracterização de folhas isoladas são considerados fatores morfológicos e fisiológicos que influem na interação da radiação eletromagnética com a folha (GAUSMAN et al., 1973). O padrão espectral das folhas é controlado pelas feições de absorção de moléculas específicas e da estrutura celular. As diferenças entre espécies e entre plantas que cresceram em condições nutricionais distintas são expressas pelas mudanças nas proporções dos constituintes foliares (USTIN et al., 1999). Segundo KNIPLING (1970), a resposta espectral da vegetação fotossinteticamente ativa possui uma região com alta absorção da radiação eletromagnética incidente, cerca de 90%. Este fato está relacionado à presença de pigmentos de clorofilas (a e b) e carotenóides nas folhas. Quando a vegetação está verde e sadia, observa-se uma predominância da clorofila, que possui faixas de alta absorção na região do azul ($0,4\mu\text{m}$ a $0,5\mu\text{m}$) e do vermelho ($0,6\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$), com uma absorção menor no verde ($0,5\mu\text{m}$ a $0,6\mu\text{m}$). Quando a resposta espectral de uma folha sadia é comparada com a de uma folha senescente, pode-se visualizar diferenças entre os padrões de resposta dos alvos. As folhas senescentes apresentam uma absorção alta nas regiões do azul e do verde. Porém, mostram uma absorção baixa na região do vermelho devido à predominância de outros pigmentos, como as xantofilas e feofitinas, em função da degradação da clorofila durante o processo de envelhecimento da

folha. Esses padrões podem caracterizar o estado fisiológico de uma vegetação, conforme ilustrado na Figura 2.

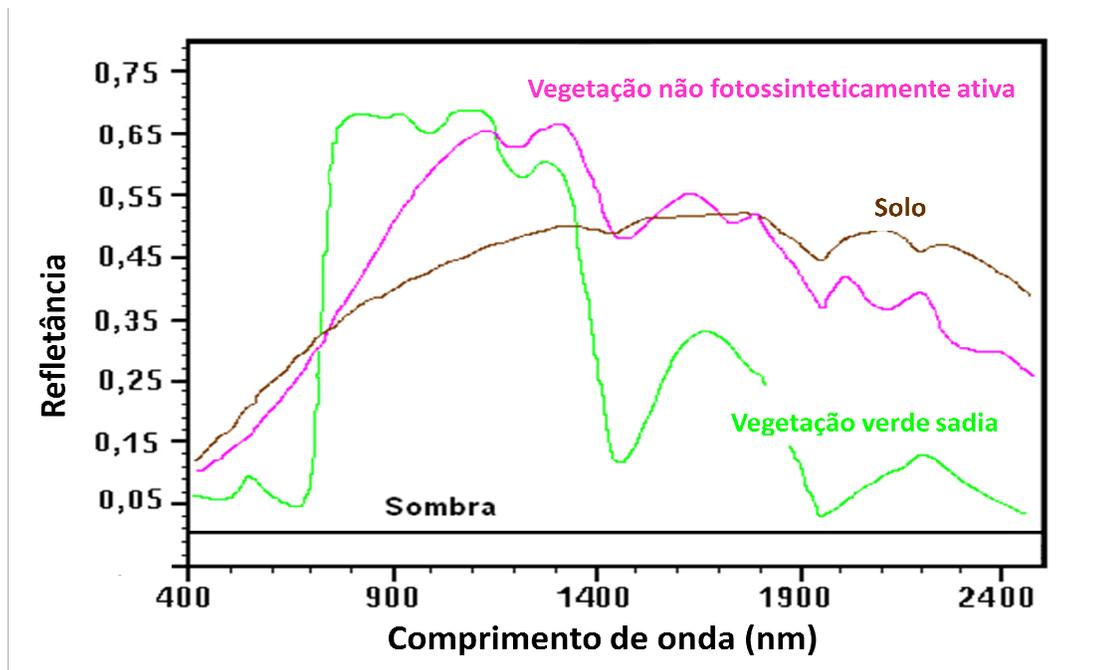


Figura 2: Curvas espectrais de vegetação verde, solo e vegetação não fotossinteticamente ativa, correspondentes a espectros de laboratório (Fonte: Adaptada de ROBERTS et al., 1997).

Apesar do conhecimento do comportamento espectral de uma folha isolada ser fundamental para o entendimento do comportamento do dossel, vários fatores contribuem para que a resposta de uma folha isolada não seja um retrato fiel da refletância do dossel. Segundo KNIPLING (1970) e GUYOT (1989), a refletância de um dossel é consideravelmente menor que a refletância de uma folha individual, embora os formatos das curvas sejam semelhantes. Esta redução é influenciada por fatores como a orientação das folhas, variações no ângulo de incidência da radiação, resposta de outros componentes do dossel, tipo de superfície de fundo e sombras. Segundo GOEL (1989), o comportamento espectral de um dossel varia de acordo com o nível de influência de vários fatores, destacando-se, entre eles, as características estruturais e biofísicas da vegetação, as propriedades espectrais dos solos, as condições de iluminação e visada do sensor e as características da atmosfera.

A porcentagem de cobertura do solo pelos dosséis das plantas pode ser determinante na avaliação de seu comportamento espectral. Segundo FORMAGGIO et al. (1989), quando se considera o ciclo de desenvolvimento de uma planta, as folhas são os elementos dominantes nas plantas e possuem forte influência sobre as propriedades espectrais dos dosséis vegetais. Quanto ao solo, observa-se um comportamento muito menos variável que a vegetação, em relação aos valores máximos e mínimos de refletância. Entre os fatores que influenciam sua refletância pode-se citar o conteúdo de água (umidade), a textura (proporção de areia, silte e argila), a rugosidade da superfície, a concentração de óxidos de ferro e o conteúdo de matéria orgânica (LILLESAND e KIEFER, 1994 citado por MOREIRA, 2000).

2.3.1. Sistemas sensores utilizados em aplicações agrícolas

Os dados dos satélites da série LANDSAT são, certamente, por fatores como longevidade da série, custo acessível das imagens e grande acervo, os mais utilizados em aplicações ambientais, tendo sido possível obter avanços na identificação, avaliação, mapeamento e acompanhamento da evolução de áreas agrícolas. O programa LANDSAT é composto de seis satélites que foram desenvolvidos pela National Aeronautics and Space Administration (NASA). O último satélite a entrar em operação foi o LANDSAT-7, lançado em abril de 1999, sendo que, atualmente, o único satélite em operação é o LANDSAT-5, que leva a bordo o sensor TM. Sua imagem é composta por sete bandas espectrais, descritas na Tabela 1. Embora esteja com sua vida operacional amplamente superada, continua fornecendo produtos de qualidade aceitável para a maioria das aplicações.

Tabela 1: Características das bandas do TM/LANDSAT, faixas espectrais (F.E.), resolução espacial (R.E.) e aplicações principais.

Banda	F.E. (μm)	R.E. (m)	Aplicações Principais
1	0,45 – 0,52	30	Mapeamento de águas costeiras Diferenciação entre solo e vegetação Diferenciação entre vegetação de conífera e decídua.
2	0,52 – 0,60	30	Refletância da vegetação verde e sadia.
3	0,63 – 0,69	30	Absorção de clorofila Diferenciação de espécies vegetais.
4	0,76 – 0,90	30	Levantamento da biomassa Delineamento de corpos d'água.
5	1,55 – 1,75	30	Medidas de umidade da vegetação Diferenciação entre nuvens e neve
6	10,4 – 12,5	120	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	2,08 – 2,35	30	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre geomorfologia, solos e geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: www.engesat.com.br

As imagens produzidas pelos satélites da série LANDSAT, ao longo de mais de duas décadas de existência, ajudaram a conhecer melhor os recursos ambientais, geológicos e agrícolas do planeta e constituem, até hoje, uma das maiores e principais fontes de dados remotos da Terra já coletadas pelo homem. Apesar disto, fatores como a resolução espacial e temporal são limitantes para o desenvolvimento de aplicações operacionais na área agrícola, principalmente as relacionadas ao monitoramento e previsão de safras, tais como as estimativas de rendimento e de área plantada das culturas. VELLOSO (1974), TARDIN et al. (1990), VELLOSO e SOUZA (1978), por exemplo, citam a resolução espacial do sistema sensor MSS/LANDSAT como uma das principais limitações para a aplicação do sensoriamento remoto no levantamento de dados sobre a cafeicultura. BATISTA et al. (1978) também destacam a baixa resolução espacial como a principal restrição para a utilização das imagens do MSS/LANDSAT na identificação e avaliação de áreas pequenas ocupadas com culturas agrícolas.

Desse modo, a melhoria da resolução espacial poderá auxiliar significativamente tanto as estimativas de rendimentos de culturas como também as estimativas de área cultivada. Sendo este último um dos parâmetros mais importantes em aplicações de monitoramento e estimativa de área agrícola, podendo, desta maneira contribuir, por exemplo, nas previsões de safras.

A partir da segunda metade da década 90, visando superar algumas limitações das imagens adquiridas pelos satélites das séries LANDSAT (Land Satellite) e SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), entre outros, novos satélites de recursos naturais começaram a ser desenvolvidos, com mudanças tecnológicas significativas nos sensores, principalmente nas suas resoluções espacial e espectral. Isto correspondeu ao desenvolvimento de sistemas orbitais com sensores possuindo resolução espacial da ordem de centímetros, como o IKONOS e o QUICKBIRD.

No caso específico da resolução espacial, segundo IPPOLITI-RAMILO (1998) e DALLEMAND et al. (1988), a sua melhoria reduz o efeito negativo provocado pela mistura de pixels que contêm vários temas distintos, aumentando a precisão dos processos de classificação automática das imagens e permitindo um controle contínuo e atualizado de grandes áreas agrícolas. Esse avanço também favorece a identificação e mapeamento de talhões de culturas de difícil separação, nos dados coletados por sensores de média resolução. Trabalhos que objetivaram avaliar o potencial da utilização de imagens de alta resolução espacial, no planejamento urbano e ambiental, têm mostrado os benefícios advindos de sua melhor resolução espacial, tais como SONG e WOODCOCK (2002), SUGUMARAN et al. (2002), HEROLD et al. (2003), LEE et al. (2003) e READ et al. (2003).

No âmbito agrícola, a utilização de imagens com melhor resolução espacial têm sido avaliada para diversas finalidades, indo desde o levantamento do uso do solo até a determinação de índices de área foliar, com base em índices de vegetação. DECHKA et al. (2002), COLOMBO et al. (2003), JOHNSON (2003) e JOHNSON et al. (2003), por exemplo, mostraram as vantagens da associação da alta resolução espacial com a melhoria da resolução radiométrica, em análises realizadas nas imagens do satélite IKONOS-II.

No ano de 2000, a empresa norte-americana DigitalGlobe, responsável pelo programa QUICKBIRD, obteve a licença da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para operar um sistema com alta resolução espacial. Em outubro de 2001, o

QUICKBIRD foi lançado em órbita, sendo o satélite com a mais alta resolução espacial disponível no mercado, chegando a 0,60m, como pode ser observado na Tabela 2. A resolução temporal varia de 1 a 3,5 dias, dependendo da latitude de interesse.

Tabela 2: Características das bandas do QUICKBIRD, faixas espectrais (F.E.), resolução espacial (R.E.) e aplicações principais.

Banda		F.E. (μm)	R.E. (m)
Pancromática		0,450 – 0,900	0,61 - 0,72
Visível	1	0,450 – 0,520	2,44 - 2,88
	2	0,520 – 0,600	
	3	0,630 – 0,690	
Infravermelho próximo	4	0,760 – 0,900	2,44 - 2,88

Fonte: www.digitalglobe.com

Segundo a Digital Globe, empresa responsável pelo QUICKBIRD, suas imagens permitem a avaliação de diversas informações acerca de áreas agrícolas, tais como: tipos de culturas e tamanhos de talhões agrícolas, análises de irrigações, fertilizantes, desgaste do solo, avaliação de avarias causadas por geadas, tempestades e pragas, além de viabilizar a utilização de técnicas de agricultura de precisão. Após o lançamento do satélite QUICKBIRD, vários trabalhos de pesquisa vêm sendo realizados a fim de avaliar a sua eficácia para o monitoramento de áreas agrícolas.

OZDARICI e TURKER (2006) avaliaram a exatidão de classificações orientadas a objetos em imagens multiespectrais (SPOT4, SPOT5, IKONOS, QUICKBIRD e a imagem pancromática do satélite QUICKBIRD) em uma área agrícola situada em Karacabey (Turquia). Na área avaliada, havia plantações de milho, tomate, arroz, pimenta, beterraba açucareira e resíduos de plantações de trigo. De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que a imagem pancromática do satélite QUICKBIRD foi a que apresentou melhor exatidão na classificação (85,2%) seguida pela imagem IKONOS (composição RGB-432) com 80,2%.

Em um estudo realizado em duas áreas com plantações de sorgo, ao sul do estado do Texas (USA), YANG et al.(2006) avaliaram o desempenho da imagem QUICKBIRD (bandas 1, 2, 3 e 4) em comparação com a imagem gerada por uma câmera KODAK MegaPlus (possuindo bandas espectrais correspondentes às do QUICKBIRD) para a estimativa do rendimento da cultura. As melhores correlações entre os dados espectrais das imagens e o rendimento da cultura foram com as bandas do azul e do verde e com um índice de vegetação denominado GVI ou NG¹. A imagem do QUICKBIRD também explicou de 38% a 71% (para o pior e melhor resultado encontrado, respectivamente) da variabilidade da produção existente na área analisada.

YANG et al. (2004) analisaram o desenvolvimento e o rendimento de plantios de algodão, em uma área localizada ao sul do estado do Texas (USA), utilizando imagem QUICKBIRD (bandas 1, 2, 3 e 4) e imagens obtidas a partir do sensor CCD aerotransportado de uma câmera KODAK MegaPlus. Embora a imagem do QUICKBIRD possuísse resolução espacial inferior à da câmera, 2,8m contra 0,67m, os dois sensores obtiveram correlações significativas com o rendimento da cultura, mostrando que a resolução de 2,8m foi suficiente para traçar os diferentes níveis de produção da cultura do algodão, para a área analisada. De acordo com os autores, os resultados deixaram evidente que a utilização de imagens do QUICKBIRD possui a vantagem de cobrir uma área maior e sua obtenção é menos dispendiosa e trabalhosa, quando comparada com a cobertura aerotransportada.

A partir de dados coletados em campo e da imagem do QUICKBIRD, obtidos em duas fazendas no estado de Minnesota (USA), WU et al. (2007) desenvolveram um método para avaliar a eficiência de índices de vegetação (IV) no cálculo do índice de área foliar (IAF) para as culturas de milho e batata. De acordo com as análises realizadas pelos autores, o índice de vegetação MSAVI² foi o que teve maior correlação com o IAF medido em campo, tanto para a cultura do milho ($r^2=0,63$) como para a da batata ($r^2=0,79$). A maior diferença no desempenho do MSAVI, em comparação com outros IV's, ocorreu quando as análises foram realizadas em dosséis densos.

¹ Índice calculado a partir da fórmula: $NG = NIR/G$, onde, NIR é o valor registrado no canal infravermelho próximo e G é o valor registrado no canal verde.

² Índice de Vegetação modificado Ajustado ao Solo
 $MSAVI = (NIR + 1) - (0,5)[(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)]^{0,5}$, onde, NIR é o valor registrado no canal infravermelho próximo e R é o valor registrado no canal vermelho.

BAUSCH et al.(2008) tiveram o objetivo de avaliar o potencial da imagem do QUICKBIRD para estimar a quantidade de nitrogênio (N) no plantio, o nitrogênio foliar (na fase VT – pendoamento) e a biomassa vegetal em plantios de milho irrigado, no município de Fort Collins, estado do Colorado (USA). O canal verde foi o que teve maior correlação com o N disponível na plantação ($r^2=0,91$), com o rendimento relativo dos grãos ($r^2=0,81$) e com a biomassa total ($r^2=0,59$). Os índices de vegetação GNDVI ($[(NIR-G)/(NIR+G)]$) e NG ou GVI (NIR/G) e o índice da clorofila ($(NIR/G)-1$) apresentaram boa correlação com a porcentagem de N disponível na folha. Segundo os autores, os resultados foram promissores e novos estudos visando estimar parâmetros agronômicos através das imagens do QUICKBIRD deveriam ser realizados. Além disso, concluíram que a utilização de dados com correção dos efeitos atmosféricos e com valores físicos (refletância) podem ser mais eficientes.

2.3.2. Processamento digital de imagens de satélite

A função principal do processamento digital de imagens é, de modo geral, fornecer ferramentas para facilitar a identificação e extração de informações contidas nas imagens, para análise posterior. O resultado deste processo é a produção de imagens contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir de imagens brutas originais (CRÓSTA, 1992). O pré-processamento consiste em minimizar algumas características das imagens digitais não provenientes da cena imageada, como as de natureza do sensor e deformações geométricas e atmosféricas, entre outras. A minimização destes fatores contribui para a melhoria da qualidade das imagens e, conseqüentemente, dos processamentos a serem realizados posteriormente.

Segundo NOVO (1988), as correções geométricas em imagens de satélite servem para reorganizar os pixels existentes nela, de acordo com um determinado sistema de projeção cartográfica. As imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a distorções espaciais e não possuem precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos apresentados nelas. Portanto, é necessária a correção geométrica destas imagens, segundo algum sistema de coordenadas, com a utilização de sistemas de processamento digital de imagens.

Uma técnica muito utilizada no pré-processamento de imagens de satélite é a correção radiométrica. A função desse tipo de tratamento é “minimizar diferenças entre os níveis de cinza registrados pelos detectores do sensor. Essas diferenças decorrem de problemas de calibração dos detectores ou da não-linearidade da resposta dos detectores à radiação da cena” (NOVO, 1988). Segundo PEREIRA et al. (1996), a utilização dos valores físicos, sobretudo da refletância, possibilita um monitoramento melhor do comportamento de uma determinada cobertura, uma vez que mudanças na sua resposta espectral estariam relacionadas somente às mudanças nas propriedades estruturais e espectrais da cobertura e não às mudanças no ângulo de iluminação solar ou variações dos sensores (degradação).

Vários autores, tais como, ROBINOVE (1982), CHEN et al (1986) e ZULLO JR (1994), mostraram as vantagens de se utilizar dados digitais de imagens de satélite transformados em valores de radiação e refletância para diversos tipos de aplicações. EPIPHANIO e FORMAGGIO (1988) realizaram um trabalho sobre a utilização do número digital e da refletância em sensoriamento remoto com base em dados de satélites. Apresentaram casos em que foi discutida a adequação da utilização de valores de números digitais e de refletância para extração de informações sobre alvos, por meio de sensoriamento remoto. Com os resultados encontrados concluíram que o comportamento espectral de alvos deve ser realizado com dados de refletância, e não com números digitais, por ser possível obter um resultado mais exato. Além disso, como primeiro passo da transformação dos níveis digitais, deve ser aplicada a correção para efeitos atmosféricos. A correção atmosférica simples, sem a transformação do número digital em refletância, também não se mostrou um procedimento adequado à observação do comportamento espectral de alvos.

A radiação captada pelo sensor é proveniente tanto do alvo quanto da atmosfera. Como o valor da radiação proveniente da atmosfera não contém informações relativas à superfície imageada, ele deve ser eliminado durante o pré-processamento das imagens (LEONARDI, 1990). Segundo ZULLO JR (1994), são vários os efeitos provocados pela atmosfera em imagens de sensoriamento remoto, tais como diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases e os aerossóis refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pela superfície da Terra. A correção atmosférica é imprescindível quando

são utilizadas imagens multitemporais ou imagens obtidas por mais de um satélite, por causa das variações das condições atmosféricas de uma data de aquisição para outra, ou da banda espectral de um satélite para outro, variações que afetam a qualidade dos resultados finais.

Vários trabalhos foram realizados, em imagens de média e baixa resolução espacial, visando avaliar os efeitos da correção atmosférica sobre os dados de sensoriamento remoto. Para imagens de alta resolução espacial, entretanto, trabalhos com correção atmosférica e radiométrica ainda são escassos, podendo-se citar o desenvolvido por WU et al. (2005) que utilizaram o método de correção atmosférica por subtração do pixel escuro, para avaliar os efeitos da correção sobre os valores de refletância da superfície, na imagem do satélite QUICKBIRD, em estudo de dosséis de milho e batata. Os resultados mostraram que as refletâncias de superfície foram superestimadas na faixa do visível e subestimadas na faixa do infravermelho próximo, quando os efeitos atmosféricos não foram devidamente considerados.

Vários sistemas computacionais foram desenvolvidos para a remoção dos efeitos atmosféricos em imagens de satélite, tal como o SCORADIS, apresentado por ZULLO JR (1994). Este programa tem como base o modelo de transferência radiativa 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*), e foi desenvolvido a partir de trabalhos experimentais realizados nas condições brasileiras de clima, disponibilidade de dados e condições atmosféricas. Vários autores vêm utilizando, com sucesso, este programa para correção de imagens de sensoriamento remoto, tais como: JOAQUIM (1998), HAMADA (2000), PELLEGRINO (2001) e VOLPATO (2002).

As transformações espectrais realizadas em imagens de sensoriamento remoto, após o pré-processamento, são processos utilizados para modificar os atributos espectrais destes dados e, assim, tornarem evidentes as características que eram pouco realçadas nos dados originais. Existem diversos métodos de transformação espectral que podem ser aplicados nas imagens, destacando-se, dentre eles, os Índices de Vegetação e a Análise por Componentes Principais (ADAMI et al., 2002).

2.3.2.1. Análise por Componentes Principais (ACP)

As transformações por componentes principais partem do princípio da existência de informações redundantes nas imagens multiespectrais. Segundo MOREIRA (2003), a

utilização desta técnica visa reduzir a dimensionalidade dos dados, isto é, condensar as informações espectrais dos alvos, contidas em várias bandas do espectro eletromagnético, em um número reduzido de bandas transformadas, sem perda de informações.

A transformação que ocorre para gerar as componentes principais é derivada da matriz de covariância entre as bandas e gera um novo conjunto de dados onde cada valor de pixel é uma combinação linear dos valores originais. O número de componentes principais é igual ao número de bandas espectrais utilizadas, sendo ordenadas de acordo com o decréscimo da variância do nível de cinza. A primeira componente principal (PC1) tem a maior variância e a última (PC n), a menor (CRÓSTA, 1992).

A primeira componente principal contém a informação de albedo mais o sombreamento topográfico, sendo que seu aspecto é o de uma imagem pancromática. Esta componente principal possui a maior parte da variância total dos dados, concentrando a informação, antes diluída, em várias dimensões. A segunda e as demais componentes principais apresentam, gradativamente, menor contraste entre os alvos e são desprovidas de informação topográfica, devido à ausência de sombreamento. A terceira e a quarta componentes principais contêm, tipicamente, menos estrutura da imagem e mais ruído que as duas primeiras, indicando a compressão dos dados nos primeiros canais (SANTOS, 2003).

A análise por componentes principais possui usos múltiplos no processamento digital de imagens e a seleção de bandas necessárias é feita em função dos objetivos pretendidos. Uma das maiores vantagens desta técnica é a eliminação da maior parte das diferenças de baixas frequências do conjunto da imagem, realizando, automaticamente, uma calibração relativa entre as imagens. CARRILHO (1996) e SIRTOLI (1998) utilizaram vários métodos para detectar mudanças na cobertura de áreas de cerrado e florestadas, obtendo, com a ACP, os melhores resultados, com pouco gasto de tempo computacional.

WATRIN et al. (1996) utilizaram a ACP para caracterizar as feições da paisagem do nordeste paraense e constataram que o produto gerado apresentou cores espectrais puras e intensamente saturadas, o que facilitou a individualização das diferentes feições e propiciou a separação das classes de uso da terra espectralmente próximas.

Segundo FREITAS e CRUZ (2005), a combinação da análise por componentes principais com o modelo linear de mistura espectral (MLME) foi o método que apresentou o melhor desempenho na discriminação entre seis classes de vegetação em uma região de Mata

Atlântica. Alguns autores como JIAJU (1988) e CHAVEZ e MACKINNON (1994) afirmam que uma das vantagens principais da utilização da ACP é o realce das informações dinâmicas entre imagens de datas distintas e a possibilidade de obter resultados satisfatórios sem a necessidade de calibrações e correções atmosféricas.

2.3.2.2. Índices de vegetação

Os índices de vegetação podem ser definidos como combinações lineares dos dados de duas ou mais bandas espectrais que ressaltam o comportamento da vegetação em relação aos solos e outros alvos terrestres. Um índice de vegetação pode ser aplicado independentemente da situação temporal ou espacial, isto é, não tem aplicação restrita a determinada região ou período (JACKSON et al., 1983). Segundo MOREIRA (2003), as duas grandes vantagens em utilizar dados orbitais transformados em índices de vegetação para quantificar e caracterizar parâmetros biofísicos de culturas agrícolas são: i) redução da dimensão das informações multiespectrais, minimizando o impacto das condições de iluminação e visada e, ii) obtenção de um índice com significado físico, isto é, um índice que forneça um número altamente correlacionado aos parâmetros agrônômicos.

Segundo IPPOLITI-RAMILO et al. (1999), os índices de vegetação podem ser agrupados em duas classes principais, que são: as razões e os índices ortogonais. As razões podem ser a divisão entre duas bandas espectrais individuais, ou o quociente de somas, diferenças ou produtos destas bandas. Os índices ortogonais são combinações de n equações lineares, calculadas com dados de n bandas espectrais. De acordo com estas duas classes existentes, diversos índices foram propostos, sendo que cada um realça ou considera um determinado fator de interesse, devendo-se escolher aquele que melhor se adapte aos objetivos de cada estudo. A Tabela 3 apresenta os quatro índices utilizados no trabalho, com base na descrição feita por PONZONI (2001).

Tabela 3: Índices de vegetação utilizados no trabalho.

Sigla	Denominação	Fórmula	Referência¹
RVI	Índice de Vegetação da Razão Simples	$\frac{IVP}{V}$	JORDAN (1973)
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada	$\frac{IVP - V}{IVP + V}$	ROUSE et al (1973)
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo	$\frac{(IVP - V) * (1 + L)}{(IVP + V + L)}$	HUETE (1988)
GVI	Índice de Vegetação do Verde	$\frac{IVP}{G}$	ROUSE et al (1973)

¹ V: refletância na faixa espectral do vermelho; IVP: refletância na faixa espectral do infravermelho próximo; L: constante para minimizar a influência do solo; G: refletância na faixa espectral do verde. Fonte: Adaptado de PONZONI (2001).

Dentre os índices de vegetação comumente citados na literatura, o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é, certamente, o utilizado com maior frequência. Séries multitemporais de seus valores, principalmente os provenientes do sensor AVHRR/NOAA, têm sido utilizados em vários trabalhos para auxiliar a identificação e classificação de vegetações terrestres, as estimativas da produção primária da vegetação, a caracterização da dinâmica da vegetação, as estimativas de precipitação, a geração de alertas de secas e os modelos de previsão climática (GONÇALVES, 2008)

Vários autores têm utilizado o NDVI a partir de imagens de média resolução espacial, como do LANDSAT, por exemplo, obtendo resultados satisfatórios em aplicações ambientais. Segundo MOREIRA (1997), ao empregar o NDVI para detectar os efeitos do estresse de água na cultura do trigo, concluiu-se que este índice foi mais consistente que a análise das informações espectrais de bandas individuais do sensor TM/LANDSAT. Utilizando o NDVI, foi possível identificar as diferenças nos valores do fator de refletância nas bandas 3 (vermelho) e 4 (infra-vermelho próximo), adquiridas em datas diferentes. Outros pesquisadores, como TURNER et al. (1992), SOUZA e PONZONI (1996) e RUDORFF et al. (1997), fizeram constatações semelhantes sobre a utilidade do NDVI.

ASRAR et al. (1984), estudando a cultura do milho, observaram que mudanças no valor do NDVI estavam relacionadas, principalmente, ao IAF da cultura. Para valores de IAF menores que 3, o NDVI foi influenciado, principalmente, pela refletância do solo, enquanto que para valores superiores a 3, o NDVI tornou-se mais dependente da refletância da

vegetação no canal do infravermelho próximo; isto é, cresceu quase que proporcionalmente aos valores observados do IAF, até o momento que este apresentou valores próximos de 6, quando ocorreu, então, a estabilização da curva. Segundo os mesmos autores, ocorreram mudanças muito pequenas no NDVI para valores elevados do IAF, neste patamar assintótico, em razão da ocorrência de mudanças ainda menores no fator de refletância do dossel.

HOBEN et al. (1980) analisaram modelos de regressão linear, em um estudo realizado com a cultura da soja, e observaram uma boa correlação entre o NDVI e o IAF, concluindo que o NDVI aumenta mais rapidamente para valores menores de IAF e tende a se estabilizar para valores maiores deste índice. Este comportamento do NDVI também foi observado por outros autores, dentre eles TURNER et al. (1999), que, utilizando regressão do tipo potência, observaram a saturação do índice NDVI quando o IAF está em torno de 3 a 5, em vegetação de clima temperado.

Fatores como variações no brilho do solo, efeitos atmosféricos e saturação rápida do NDVI geraram grande interesse no desenvolvimento de outros índices que visassem minimizar um ou mais desses efeitos. Para minimizar os efeitos da resposta espectral do solo de fundo na vegetação, RICHARDSON e WIEGAND (1977) propuseram o índice de vegetação denominado *Perpendicular Vegetation Index* (PVI), que representa, no plano cartesiano “banda do vermelho x banda do infravermelho próximo”, a distância perpendicular entre a refletância de um dossel e a linha de solos.³

HUETE (1988), considerando que os valores de refletância de um dossel sobre diferentes solos de fundo não são descritos corretamente pelos índices NDVI e PVI, propôs o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). Este índice foi desenvolvido com o propósito de favorecer o estabelecimento de modelos globais simples, que possam delinear a dinâmica dos sistemas solo-vegetação a partir de dados de sensoriamento remoto. Este índice difere-se do NDVI pela adição da constante L ao denominador da equação. Para ajustar os valores do índice entre - 1 e 1, multiplicou-se o numerador do índice por “1+L”, favorecendo uma interpretação melhor dos seus resultados, por ser a mesma faixa de valores possíveis do NDVI. De acordo com BARET e GUYOT (1991), a introdução do parâmetro L na definição do índice

³ A fórmula utilizada para o cálculo deste índice pode ser observada na Tabela 3.

permitiu minimizar as influências do brilho do solo e gerar isolinhas de vegetação mais independentes das características do solo⁴.

EIPHANIO et al. (1996a), estudando as variações dos índices de vegetação NDVI, PVI e SAVI, calculados a partir de imagens do TM/LANDSAT, em relação aos parâmetros solo, ângulo de visada e ângulo de iluminação, num experimento com a cultura do feijão (em quatro estágios de desenvolvimento) puderam concluir que: i) os índices de vegetação apresentaram diferenças significativas quanto ao solo nos quatro estágios de desenvolvimento da cultura; ii) o ângulo de visada afetou de forma significativa o NDVI no estágio inicial de crescimento da cultura do feijão; iii) os índices de vegetação não foram influenciados pelo ângulo de iluminação, quando a cultura cobriu totalmente o solo; iv) ocorreu uma saturação no valor do NDVI, enquanto o SAVI e o PVI continuaram a responder aos tratamentos, principalmente em decorrência de suas sensibilidades ao infravermelho.

Em estudo realizado com imagens do TM/LANDSAT, EIPHANIO et al. (1996b) avaliaram os índices de vegetação NDVI e SAVI, no desenvolvimento da cultura do trigo, e mostraram que a alteração do ângulo de visada de 0° para 30° teve um impacto positivo nas correlações das variáveis agrônômicas estudadas com o SAVI e negativo com o NDVI. Este efeito foi atribuído às sensibilidades diferenciadas dos índices de vegetação em relação às suas bandas constituintes. ALMEIDA et al. (2005) mostraram que alguns índices de vegetação, entre eles o NDVI e PVI, podem ser utilizados como estimadores remotos do IAF da cultura da soja e, portanto, podem ser extremamente importantes em programas de monitoramento e previsão de safras.

2.4. Sensoriamento remoto orbital no estudo de culturas perenes

Nas culturas anuais, em que o desenvolvimento da planta é rápido, elas mantêm, por algum tempo, as características típicas de dosséis agrícolas após cobrirem o solo. Nesses casos, ocorre a diminuição da influência do solo e de outros componentes do substrato. No caso de culturas perenes, onde o desenvolvimento da planta é lento, fatores como o solo, a sistemática de uso de implementos agrícolas, os tratamentos culturais, o sombreamento intra e entre fileiras e as características sazonais da planta são importantes no estudo do comportamento

⁴ A fórmula utilizada para o cálculo deste índice pode ser observada na Tabela 3.

espectral das culturas (EIPHANIO et al., 1994), conforme ilustrado na Figura 3. Fatores relacionados à atmosfera, topografia e tipo do sensor afetam de maneira parecida as culturas anuais e as perenes.

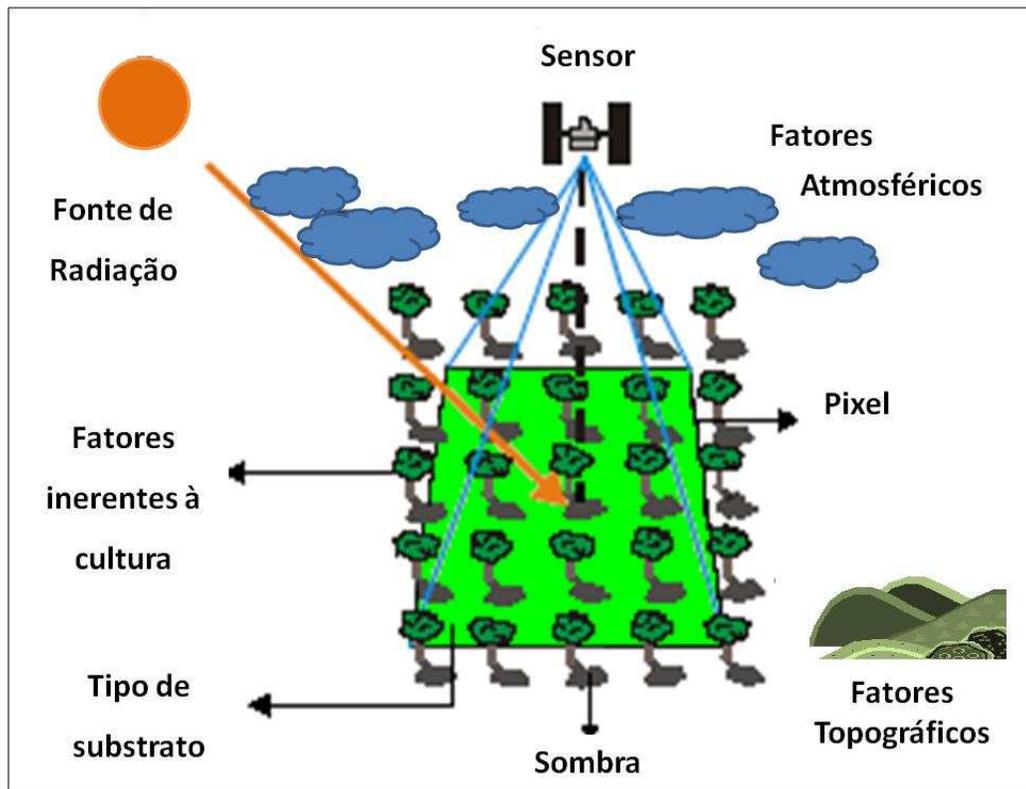


Figura 3: Fatores que influenciam a resposta espectral de dosséis agrícolas (Fonte: Adaptada de EIPHANIO et al., 1994).

Trabalhos realizados em culturas perenes, tais como citrus e café, mostram que, apesar das dificuldades para a compreensão da resposta destas culturas, a utilização do sensoriamento remoto orbital é viável no levantamento e monitoramento delas. TARDIN et al. (1990), utilizaram dados digitais do TM/LANDSAT correspondentes aos canais 3 (vermelho), 4 (infravermelho), 5 e 7 (infravermelho médio), para diferenciar culturas de café, citrus e cana-de-açúcar, na região de Furnas (MG). As imagens foram analisadas com um algoritmo de máxima verossimilhança para obtenção de matrizes de classificação. A banda 3 foi decisiva na discriminação da cana-de-açúcar, café e citrus. O melhor desempenho médio de classificação para as três culturas, 97,9%, foi alcançado com a combinação 3, 4 e 5.

BATISTA et al. (1990) utilizaram os produtos HRV/SPOT e TM/LANDSAT para avaliar a discriminação das culturas de café, cana-de-açúcar, trigo e pastagem no noroeste do estado do Paraná. Nas análises visuais, considerando cada uma das culturas individualmente, o café foi mais bem discriminado com XS/SPOT e TM/LANDSAT, a pastagem com Pan/SPOT, o trigo com XS/SPOT e TM/LANDSAT e a cana-de-açúcar com o XS/SPOT e TM/LANDSAT. Individualmente, as bandas do visível, tanto do SPOT quanto do LANDSAT, obtiveram um desempenho melhor que os canais do infravermelho próximo para a discriminação espectral de café e pastagem. A utilização de imagens SPOT mostrou grande benefício para a classificação visual devido, especialmente, ao canal pancromático que possui resolução espacial melhor.

ADAMI (2003), com o propósito de estimar áreas cultivadas com café, milho e soja, utilizou técnicas de geoprocessamento associadas a estimadores por expansão direta e análises de regressões e concluiu que é possível estimar áreas com café a partir da metodologia utilizada. Segundo o autor, para a cultura do café, o estimador de regressão teve eficiência relativa bem maior que o estimador por expansão direta devido à disponibilidade de imagens livres de cobertura de nuvens. Além disso, o coeficiente de variação passou de 34,9% na expansão direta para 12,9% na regressão.

Utilizando imagens aéreas digitais, CAMPOS et al. (2005) estudaram a variabilidade espacial da produtividade da cafeicultura de montanha e concluíram que o índice espectral banda verde normalizado (Vdn), em imagens aéreas “falsa-cor”, pode gerar relações significativas com a variabilidade espacial da produtividade. A época mais adequada para obter imagens aéreas, visando a estimativa da variabilidade de produtividade na cafeicultura de montanha, foi a mais próxima do período de pós-colheita da safra anterior. O modelo estudado propiciou erros maiores nas áreas infestadas de plantas daninhas e nos cafeeiros mais antigos.

SHRIVASTANA e GEBELEIN (2007) analisaram áreas com plantios de citros, no estado da Flórida, a partir de dados do ETM+/LANDSAT. Foram realizadas classificações supervisionadas, em 26 municípios, para avaliar o tamanho da área plantada com citros. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a metodologia aplicada subestimou a área plantada em 30% e que o erro foi maior quanto maior era o número de classes de uso agrícola considerado.

Para avaliar a possibilidade de discriminar variedades de citros, SANCHES et al. (2005) utilizaram imagens CCD/CBERS-2 do município de Itirapina (SP), onde foram identificadas as seguintes variedades de laranja: Valência, Pera, Murcote, Lima Verde e talhões sem plantios. Os autores concluíram que foi possível discriminar algumas variedades de citros e que a época seca foi a mais indicada para este tipo de estudo. A separação das variedades de citros só foi possível após agrupá-las em classes. Dos seis mapas gerados pelas classificações realizadas, segundo o índice Kappa, um mapa foi considerado “muito bom”, dois “bons”, um “razoável” e dois “ruins”, sendo que o melhor resultado foi obtido com o classificador Iseseg.

MOREIRA et al. (2003), estudando o comportamento espectral de áreas de café em imagens dos sensores TM e ETM+ do LANDSAT, com o objetivo de mapear a cultura, mostraram que as imagens apropriadas para o mapeamento de áreas cafeeiras em formação e produção foram as da banda 4 (infravermelho próximo) desses sensores, adquiridas na época mais seca do ano (agosto e setembro).

São escassos os estudos realizados com sensores de alta e média resolução espacial, como TM/LANDSAT, HRV/SPOT, IKONOS e QUICKBIRD, com o objetivo de estimar parâmetros biofísicos de culturas perenes a partir de dados remotos. A maior parte dos estudos desenvolvidos utilizou o processo de classificação com a finalidade de separar os plantios perenes de outras culturas ou de vegetações nativas. Alguns trabalhos tiveram o propósito de avaliar os parâmetros agrônômicos de culturas perenes em comparação com a sua resposta espectral, entre eles o de COVRE (1989), que avaliou a influência de parâmetros culturais de plantios de citros sobre os dados do TM/LANDSAT. Dentre os parâmetros culturais avaliados, a porcentagem de cobertura do terreno por árvores de citros e a proporção de vegetação nas entrelinhas dos talhões foram as que influenciaram mais significativamente a resposta espectral dos pomares. O parâmetro “porcentagem de cobertura do terreno por árvores de citros” não apresentou relacionamento significativo com a banda 4. Segundo o autor, tal fato deveu-se ao aumento de sombras associado ao aumento deste parâmetro.

Ainda segundo COVRE (1989), a complexidade da resposta espectral dos pomares de citros pode ser expressa em função da variação de três parâmetros básicos da superfície dos pomares: as plantas de citros, as sombras produzidas por elas e o substrato. A variabilidade de

situações encontradas em cada um destes componentes e as influências de uns sobre os outros, causam uma grande heterogeneidade de respostas para o sensor TM do LANDSAT.

VIEIRA et al (2001) estudaram a correlação entre parâmetros culturais e a resposta espectral da cultura do café, a partir de imagens do TM/LANDSAT, com objetivo de estabelecer padrões de identificação para esta cultura. Os resultados mostraram que, dentre as variáveis culturais avaliadas, apenas a percentagem de cobertura do terreno por plantas de café mostrou resposta significativa quando correlacionada com a resposta espectral da cultura na banda 4. Os autores afirmaram que em cafezais formados (com cobertura maior que 50%), e em bom estado produtivo, o levantamento com a utilização do TM/LANDSAT pode ser viável.

LEONARDI (1990) utilizou dados do TM/LANDSAT e dados levantados em campo para avaliar a influência dos parâmetros culturais do café sobre sua resposta espectral. Os resultados mostraram que parâmetros relativos às características das plantas (tais como ano de poda, altura, porcentagem de cobertura do terreno, idade, vigor vegetativo e tipo de poda) são mais bem correlacionados com a refletância do cafezal do que parâmetros relativos às características do substrato (tais como matéria orgânica, ervas daninhas verdes e solo exposto) ou da geometria (orientação das fileiras de plantio, declividade e orientação do declive, por exemplo). O resultado da análise de regressão mostrou que ocorreu influência predominante dos parâmetros “altura da planta” e “porcentagem de cobertura do terreno” na resposta espectral do dossel de café, para a área avaliada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A área de estudo utilizada no trabalho está localizada na Região da Alta Mogiana, entre os municípios de Franca, Ribeirão Corrente e Cristais Paulista, a noroeste do estado de São Paulo, delimitada pelas coordenadas 20°26' e 20°29' de latitude Sul e 47°26' e 47°34' de longitude Oeste, conforme ilustrado na Figura 4. Dentre os fatores técnicos que influenciaram a escolha da área destacam-se: alta tecnologia aplicada a lavouras da região, disponibilidade de informações referentes aos tratos culturais, topografia suavemente ondulada, permissão de acesso a área e apoio dos técnicos da Cocapec (Cooperativa de Cafeicultores e Agropecuaristas) de Franca.

A região da Alta Mogiana possui altitudes que variam de 900m a 1000m, solos arenosos e produz café da espécie arábica, sendo que as variedades mais cultivadas são Mundo Novo e Catuaí. A adubação é uma necessidade para as lavouras da região, pois possui solos de fertilidade média. Os produtores também utilizam mecanização na colheita e nos tratos culturais, o que é possível em virtude da topografia suavemente ondulada. Com relação à irrigação, não foram realizados grandes investimentos, mas algumas áreas são encontradas. Os principais problemas dos cafeicultores da região são os ataques de pragas e doenças (como bicho mineiro, cochonilhas, cigarras e ferrugem), além de estiagens e geadas. Segundo PICINI et al (1999), a produção e a sustentabilidade da região se devem à maior adoção de tecnologia, maior renovação do parque cafeeiro, melhor qualidade de bebida e, fundamentalmente, às condições climáticas apropriadas para o cultivo do café arábica.

Os municípios de Franca, Pedregulho e Ribeirão Corrente são responsáveis, em conjunto, por 25% do café colhido na região de Franca (CENTRO DE INTELIGÊNCIA DO CAFÉ, 2008). Segundo o IEA (2008), a região administrativa (RA) de Franca deve produzir durante o ano agrícola 2008/09, cerca de aproximadamente 1.300.000 sacas de café beneficiado, com uma área de 47.546ha em produção e 5.094ha de áreas novas.

As seis propriedades utilizadas no estudo (Bela Vista I, Bela Vista II, São Manuel, Cotia, Santa Célia, Santa Terezinha) produzem café arábica, das variedades Mundo Novo e Catuaí (Vermelho e Amarelo), sendo que a maior parte dos talhões (93,3%) utilizados no trabalho estava em fase de produção. Na área de estudo, a média é de 15 sacas/ha, em ano de baixa produção, e 47 sacas/ha, em anos de alta produtividade, de acordo com as informações cedidas pelo administrador.

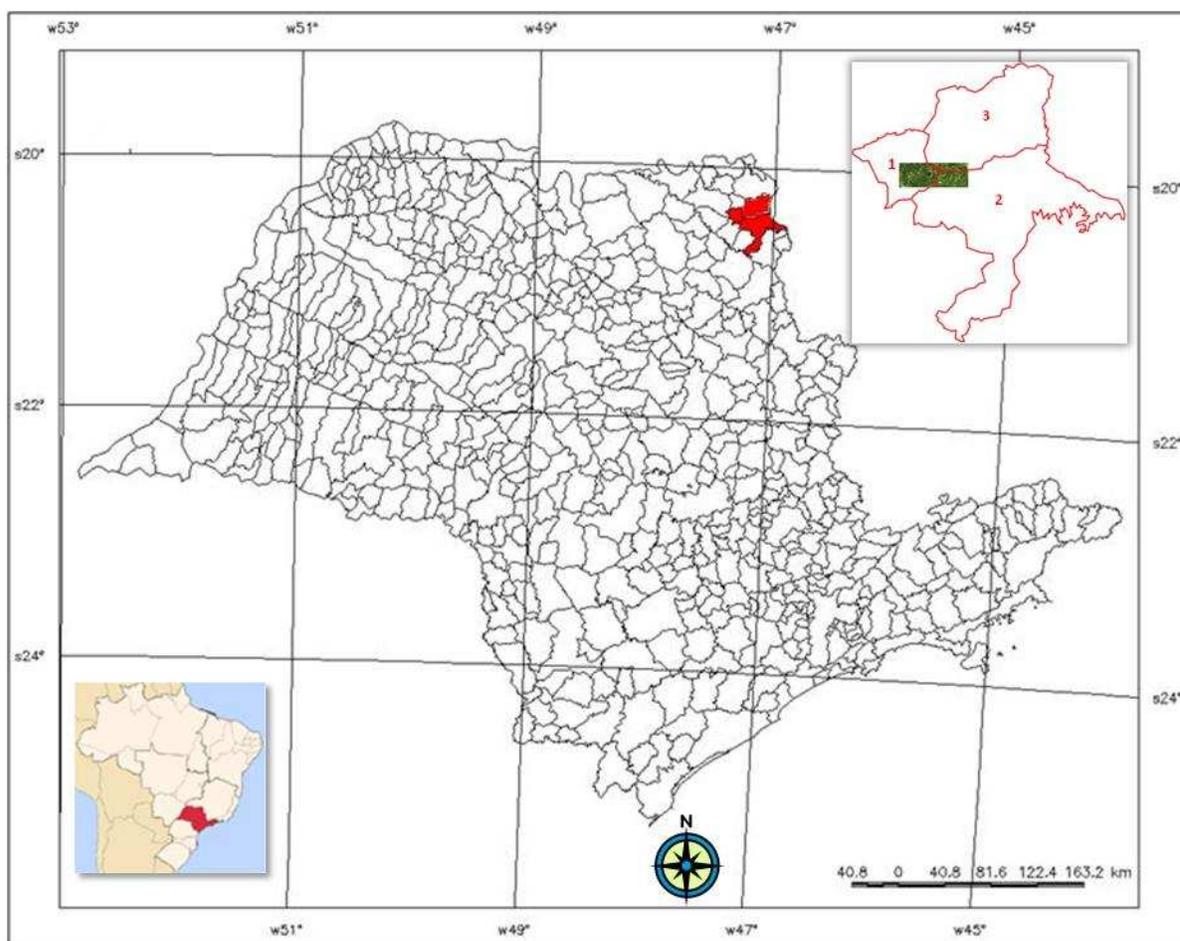


Figura 4: Localização da área de estudo, entre os municípios de Ribeirão Corrente (1), Franca (2) e Cristais Paulista (3).

3.2. Imagens

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas imagens dos satélites QUICKBIRD e TM/LANDSAT. A imagem do QUICKBIRD foi adquirida no dia 5 de fevereiro de 2006, possuindo 69km², correspondendo à região de divisa entre os municípios de

Ribeirão Corrente, Franca e Cristais Paulista. A imagem possui quatro bandas espectrais, sendo três no visível (B1-azul, 450nm a 520nm; B2-verde, 520nm a 600nm; B3-vermelho, 630nm a 690nm) e uma no infravermelho próximo (B4, 760nm a 900nm), com resolução radiométrica de 16 bits e resolução espacial de 2,44m. Na Figura 5, pode-se observar o esquema de iluminação da cena no momento da aquisição da imagem do QUICKBIRD.

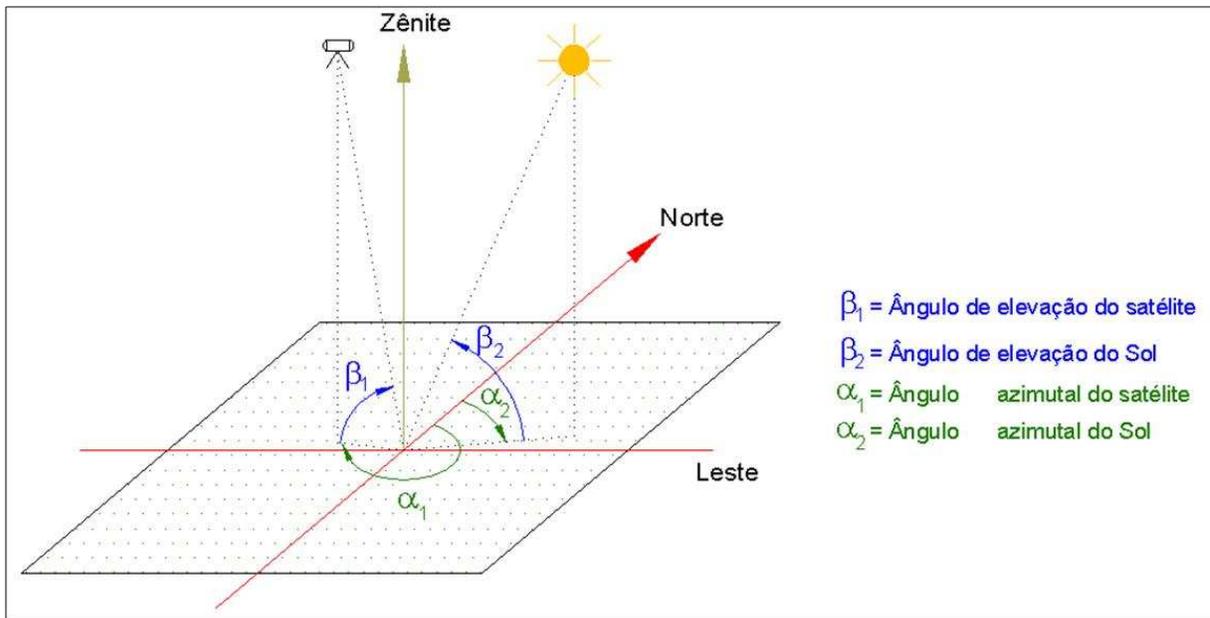


Figura 5: Ângulos solar e de visada do satélite QUICKBIRD no momento de aquisição da imagem, em 05/02/2006, onde $\beta_1=83,2^\circ$, $\beta_2=66,5^\circ$, $\alpha_1= 280,6^\circ$ e $\alpha_2=83,2^\circ$.

A imagem do satélite TM/LANDSAT-5 é do dia 24 de janeiro de 2006, pertencendo à órbita/ponto 220/74, com seis bandas espectrais, sendo três no visível (B1-azul, 450nm a 520nm; B2-verde, 520nm a 600nm; B3-vermelho, 630nm a 690nm) e três na região do infravermelho (B4-infravermelho próximo, 760nm a 900nm; B5- infravermelho médio, 1550nm a 1750nm e B7- infravermelho médio, 2080nm a 2350nm), com resolução radiométrica de 8 bits e resolução espacial de 30m. Na Figura 6, pode-se observar o esquema de iluminação da cena no momento de aquisição da imagem do TM/LANDSAT-5.

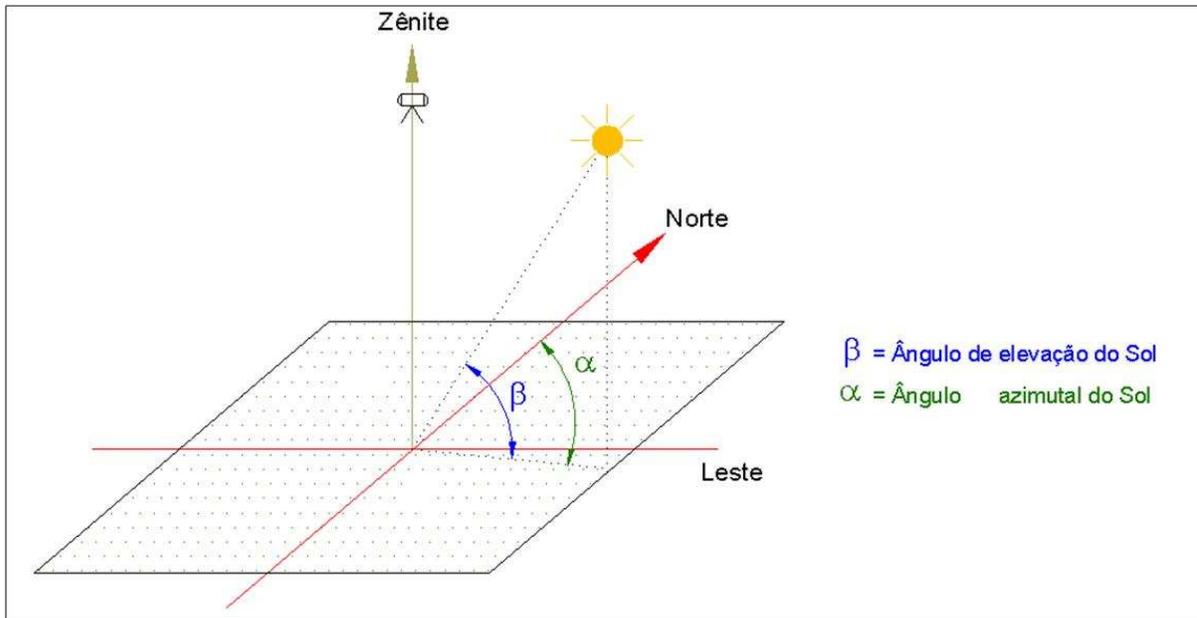


Figura 6: Ângulos solar e de visada do satélite TM/LANDSAT-5 no momento de aquisição da imagem, em 24/01/2006, onde $\beta=57,58^\circ$ e $\alpha=94,74^\circ$.

As Figuras 7 e 8 mostram a área de estudo nas imagens TM/LANDSAT e QUICKBIRD, respectivamente.

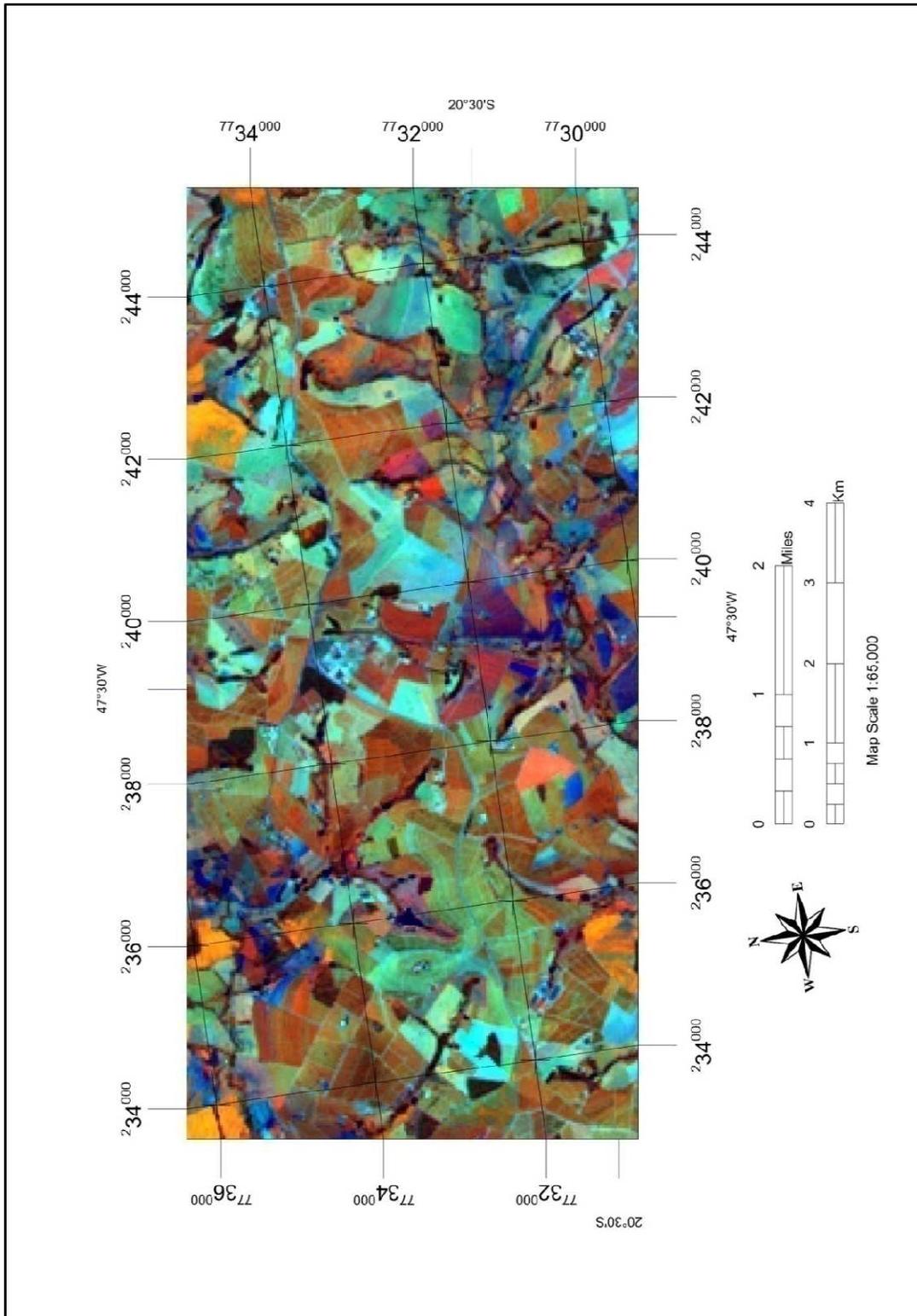


Figura 7: Imagem do satélite LANDSAT/TM (RGB-453) mostrando a área de estudo com resolução espacial de 30m.

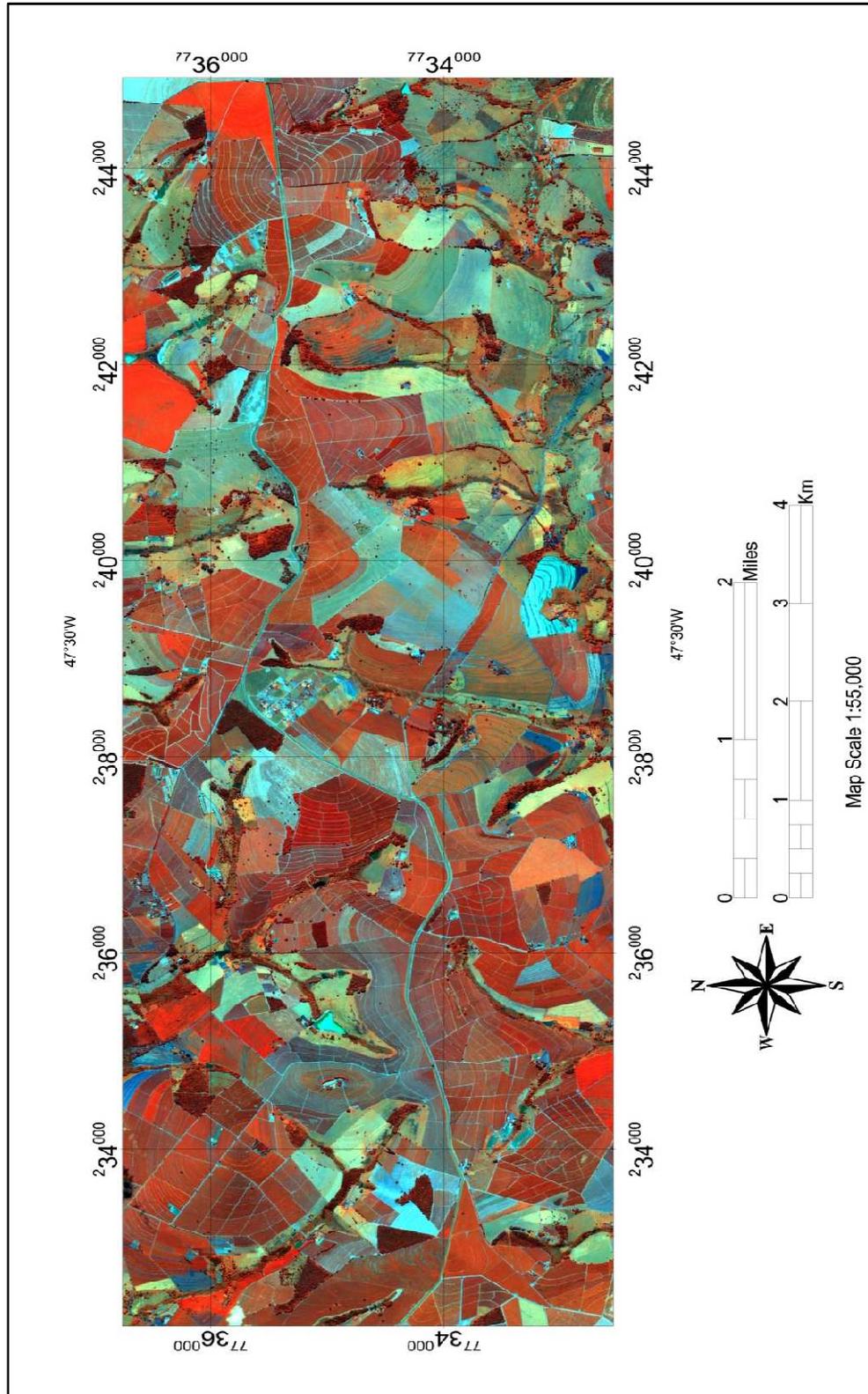


Figura 8: Imagem do satélite QUICKBIRD (RGB-423) com resolução espacial de 2,4m mostrando a área de estudo.

3.3. Dados de campo

O levantamento de campo foi realizado em três campanhas, entre os meses de março e abril 2006, após o recebimento da imagem QUICKBIRD, época em que os plantios de café encontravam-se no período reprodutivo, na fase de maturação dos frutos, conforme ilustrado nas Fotos 1 e 2 do Apêndice. Em campo, foram levantados os seguintes parâmetros:

a. *Espaçamentos entre linhas (EL) e na linha ou entre plantas (EP)*: espaçamento entre troncos em duas linhas de plantio (EL) e espaçamento entre troncos na linha de plantio (EP), de acordo com o esquema apresentado na Figura 9.

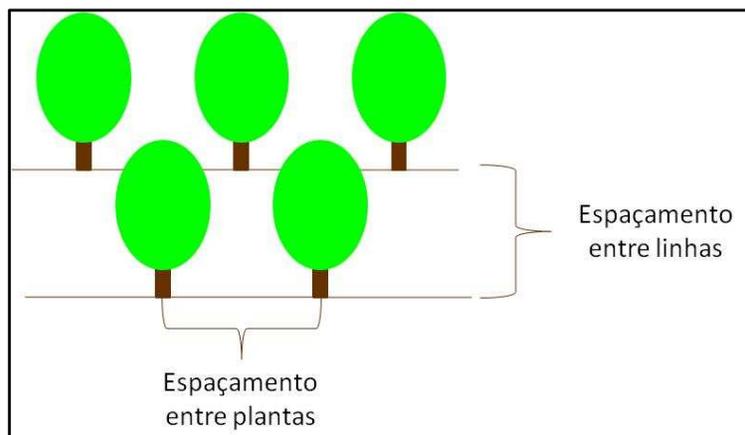


Figura 9: Esquema mostrando a determinação da medição dos espaçamentos entre linhas e na linha de plantio.

b. *Porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas de café (% Cob.)*: foi calculada a partir da área ocupada pelas plantas de acordo com as Equações 1 e 2.

- Para talhões com formação em renque (espaçamento entre plantas menor ou igual ao diâmetro médio das plantas), conforme ilustrado na Figura 10.

$$\% \text{ Cob} = \left(\frac{D}{EL} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde, D é o diâmetro das plantas (m) e EL o espaçamento entre linhas de plantio (m).



Figura 10: Foto mostrando talhão com plantio em renque.

- Para talhões onde o espaçamento entre plantas é maior que o diâmetro médio das plantas nos casos em que elas ainda não formaram renque, conforme ilustrado na Figura 11.

$$\%Cob = \frac{\pi \cdot r^2}{EL \cdot EP} \cdot 100 \quad (2)$$

onde, EL é o espaçamento entre linhas de plantio (m) e EP é espaçamento entre plantas na linha de plantio (m).



Figura 11: Foto mostrando plantio novo (café em formação), em que ainda não ocorreu a formação em renque.

c. *Índice de área foliar (IAF)*: calculado pelo método desenvolvido por FAVARIN et al. (2002), de acordo com a Equação 3, sendo utilizado por não ser destrutivo e as variáveis utilizadas serem facilmente mensuráveis.

$$IAF=0,0134+0,7276.Di^2.Hd \quad (3)$$

onde, Di é o diâmetro da seção inferior do dossel (m) e Hd a altura do dossel (m).

d. *Densidade populacional (Dens)*: determinada pela fórmula de LEONARDI (1990), descrita pela Equação 4.

$$Dens=\frac{10.000}{EL.EP} \quad (4)$$

onde, Dens é a densidade populacional (covas/ha), EL é o espaçamento entre linhas (m) e EP é o espaçamento entre covas ou plantas (m)

e. *Biomassa*: foi realizado utilizando-se a altura média das plantas nos talhões de acordo com a Equação 5 proposta por PÁSCUA (2002).

$$\ln(B)=0,31543-0,87970.\left(\frac{1}{h}\right) \quad (5)$$

onde, B é a biomassa seca (t/ha) e h é a altura da planta (m)

f. *Diâmetro da copa*: calculado com base na medida do raio, que foi realizada a partir do tronco até o último ramo inferior da copa, em direção à linha de plantio, conforme ilustrado na Figura 12.



Figura 12: Esquema mostrando a medida utilizada para o cálculo do diâmetro das plantas.
g. *Varietade*: obtida em consulta junto ao administrador responsável pela área estudada.

h. Altura: medida, em metros, realizada do nível do solo até a extremidade da planta.

i. Rugosidade: calculada a partir do desvio-padrão dos valores da altura, segundo metodologia utilizada por PONZONI e REZENDE (2004).

Os parâmetros levantados em campo foram escolhidos de acordo com os seguintes critérios:

i) espaçamentos, variedade, densidade populacional e altura foram levantados por fazerem parte dos questionários para fins de previsão de safra;

ii) %COB (porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas de café) e rugosidade, por mostrarem-se bem correlacionados com dados espectrais oriundos de satélites, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por LEONARDI (1990), COVRE (1989) e PONZONI e REZENDE (2004);

iii) o IAF e a biomassa foram levantados por serem indicativos de produtividade da cultura, segundo FAVARIN et al. (2002) e JONASSON (1988), respectivamente.

Selecionou-se 30 talhões dentro da área de estudo onde foram realizadas as coletas de dados (Figura 13 e 14). A escolha destes talhões foi realizada em conjunto com o administrador da área e com técnicos da COCAPEC levando em consideração o manejo, a acessibilidade e a distribuição espacial deles. Nos talhões selecionados foram realizadas medidas em 15 plantas, sendo que os valores dos parâmetros biofísicos utilizados no trabalho correspondem à média aritmética das plantas amostradas em campo.

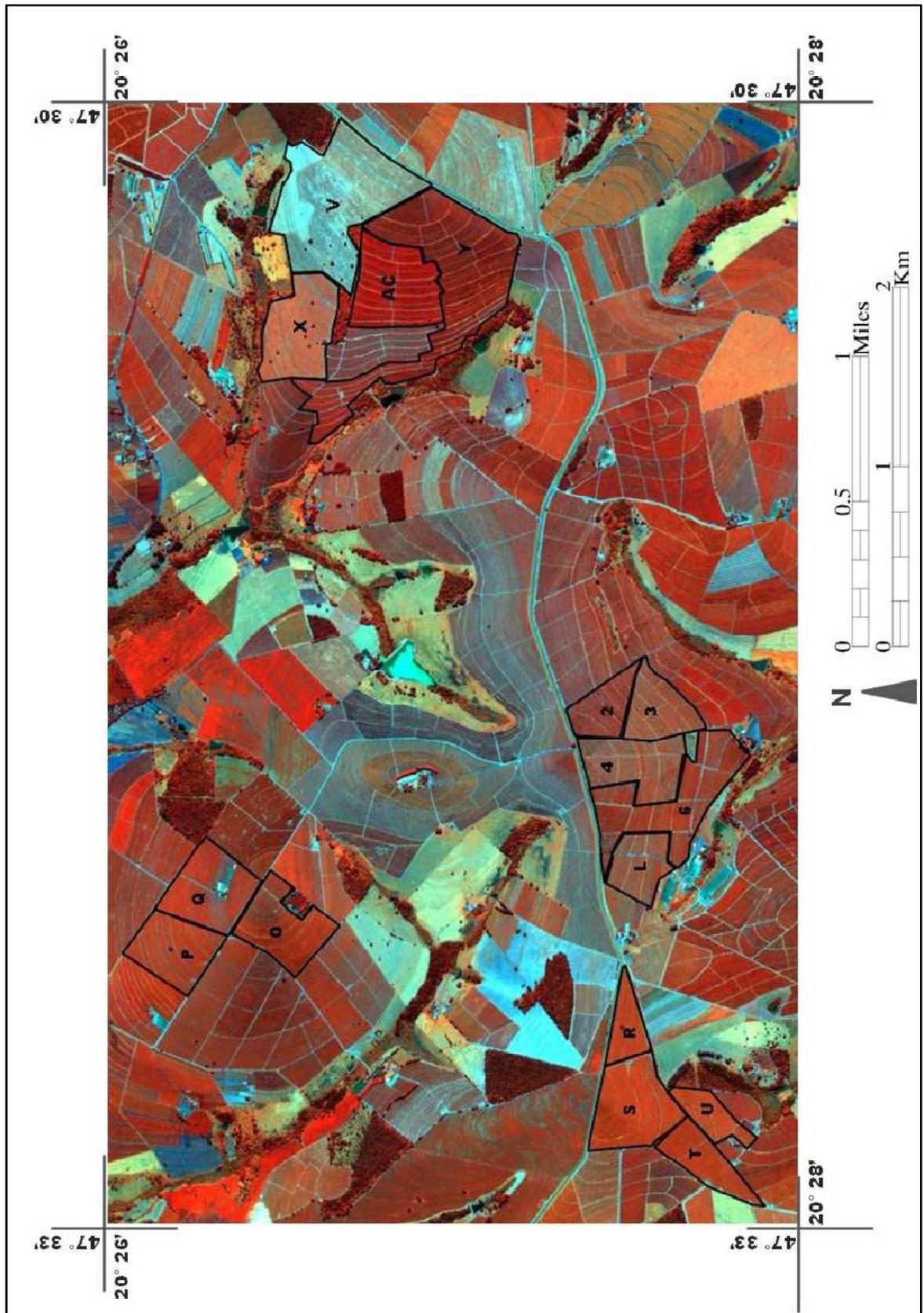


Figura 13: Localização dos talhões seleccionados para o estudo.

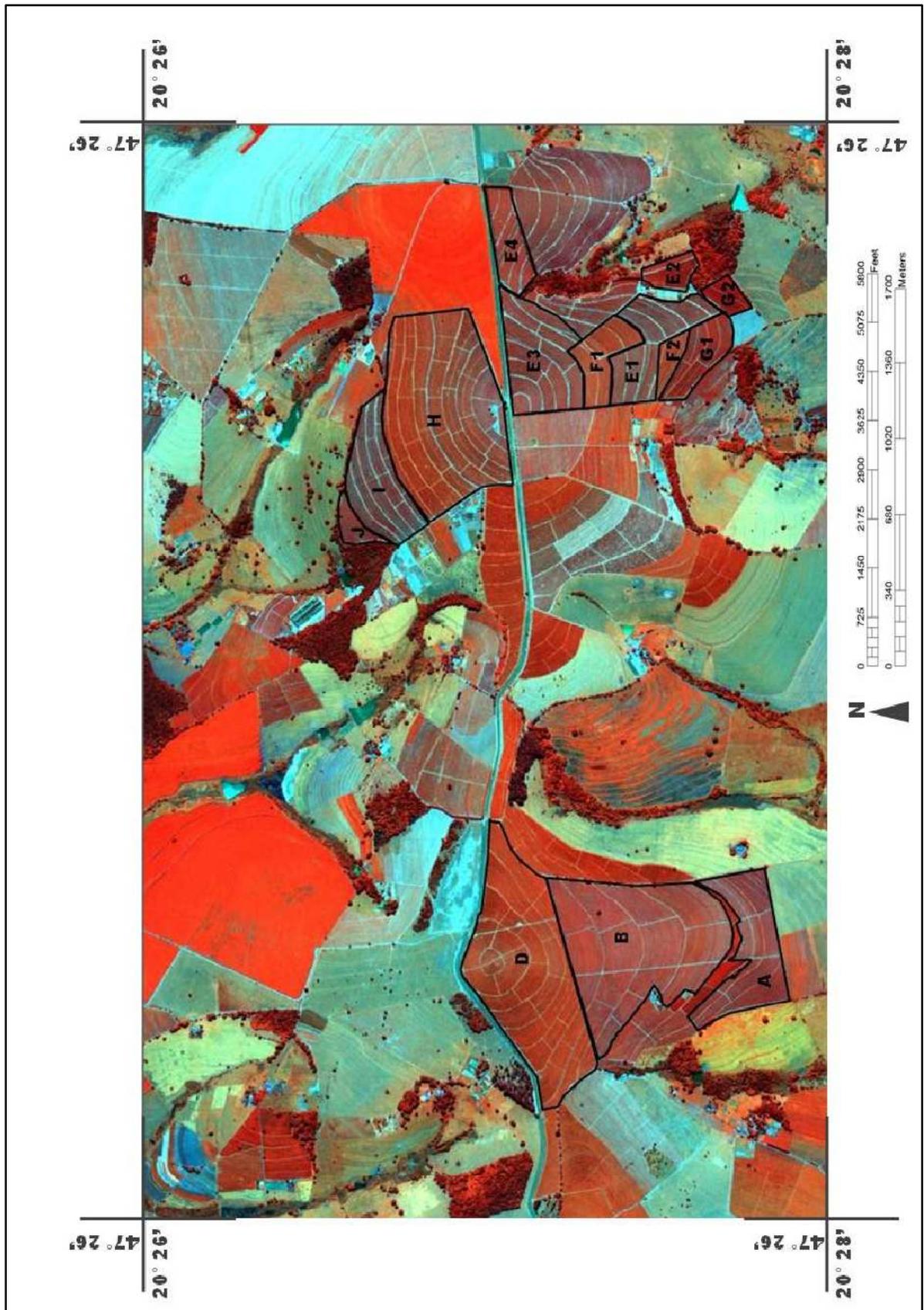


Figura 14: Localização dos talhões selecionados para o estudo.

A Tabela 4 apresenta os dados levantados em campo após organização e cálculos realizados.

Tabela 4: Descrição dos valores médios dos parâmetros biofísicos nos trinta talhões amostrados em campo.

Talhão	Varied	EL (m)	EP (m)	Diâm (m)	Alt. (m)	IAF (m ² .m ⁻²)	%Cob (m)	Biom (t/ha)	Dens pl/ha	Rugos (m)
2	MN	4,0	1,0	1,3	1,9	2,1	33,3	0,90	2500,0	0,3
3	MN	3,0	1,0	1,8	1,8	3,7	60,0	0,89	3333,3	0,1
4	MN	3,0	1,3	2,1	2,7	6,8	69,0	0,99	2564,1	0,5
6	MN	1,5	0,7	1,2	2,1	4,6	80,7	0,92	9523,8	0,2
A	MN	3,0	0,9	2,1	2,4	6,3	71,3	0,95	3921,6	0,3
Ac	Catuaí	2,0	0,7	1,9	1,7	4,1	96,0	0,86	7692,3	0,1
B	Catuaí	3,8	0,6	2,1	2,1	5,4	55,0	0,92	4386,0	0,1
D	Catuaí	4,0	0,9	1,5	2,0	3,4	38,5	0,92	2941,2	0,1
E1	MN	3,8	1,0	2,6	2,2	7,5	68,1	0,93	2631,6	0,2
E2	MN	3,8	1,0	2,6	2,2	7,5	68,1	0,93	2631,6	0,2
E3	MN	3,8	1,0	2,6	2,2	7,5	68,1	0,93	2631,6	0,2
E4	MN	3,8	1,0	2,6	2,2	7,5	68,1	0,93	2631,6	0,2
F1	MN	3,8	1,0	2,2	2,2	6,1	57,8	0,94	2631,6	0,2
F2	MN	3,8	1,0	2,2	2,2	6,1	57,8	0,94	2631,6	0,2
G1	MN+Cat.	2,0	1,0	1,9	2,1	4,8	95,0	0,92	5000,0	0,4
G2	MN+Cat.	2,0	1,0	1,9	2,1	4,8	95,0	0,92	5000,0	0,4
H	Catuaí	3,5	0,8	2,2	2,2	6,0	62,9	0,93	3571,4	0,1
I	MN	3,5	0,8	2,1	2,1	5,3	58,6	0,92	3571,4	0,3
J	Catuaí	3,0	0,7	2,2	2,3	6,3	72,0	0,95	4761,9	0,3
L	Catuaí	3,0	1,0	1,9	2,0	4,7	64,0	0,91	3333,3	0,2
O	Catuaí	3,2	0,7	1,9	2,1	4,8	58,1	0,93	4464,3	0,2
P	Catuaí	3,0	1,0	2,0	2,3	5,5	66,7	0,94	3333,3	0,2
Q	MN	3,5	0,8	1,7	2,2	4,2	47,5	0,93	3809,5	0,1
R	Catuaí	4,0	2,0	2,1	2,1	5,7	52,9	0,93	1250,0	0,3
S	MN	4,0	1,3	2,0	2,8	6,9	50,4	1,00	2000,0	0,2
T	MN	4,0	1,3	2,3	2,6	7,5	58,4	0,97	2000,0	0,3
U	Catuaí	4,0	1,5	2,1	2,4	6,2	52,7	0,96	1666,7	0,4
V	Catuaí	3,5	0,8	0,7	0,9	0,1	14,0	0,61	3809,5	0,1
X	MN	3,5	0,8	0,9	1,3	0,7	24,5	0,76	3809,5	0,1
Y	MN	3,5	0,9	1,8	2,6	5,5	51,6	0,98	3361,3	0,2

Legenda: MN (variedade Mundo Novo), EL (espaçamento entre linhas de plantio), EP (espaçamento entre plantas na linha de plantio), Diam (diâmetro das plantas), Alt (altura), IAF (índice de área foliar), %Cob (porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas), Biom (biomassa), Dens (densidade populacional) e Rugos (rugosidade).

3.4. Metodologia

O fluxograma da Figura 15 apresenta os procedimentos metodológicos utilizados no trabalho.

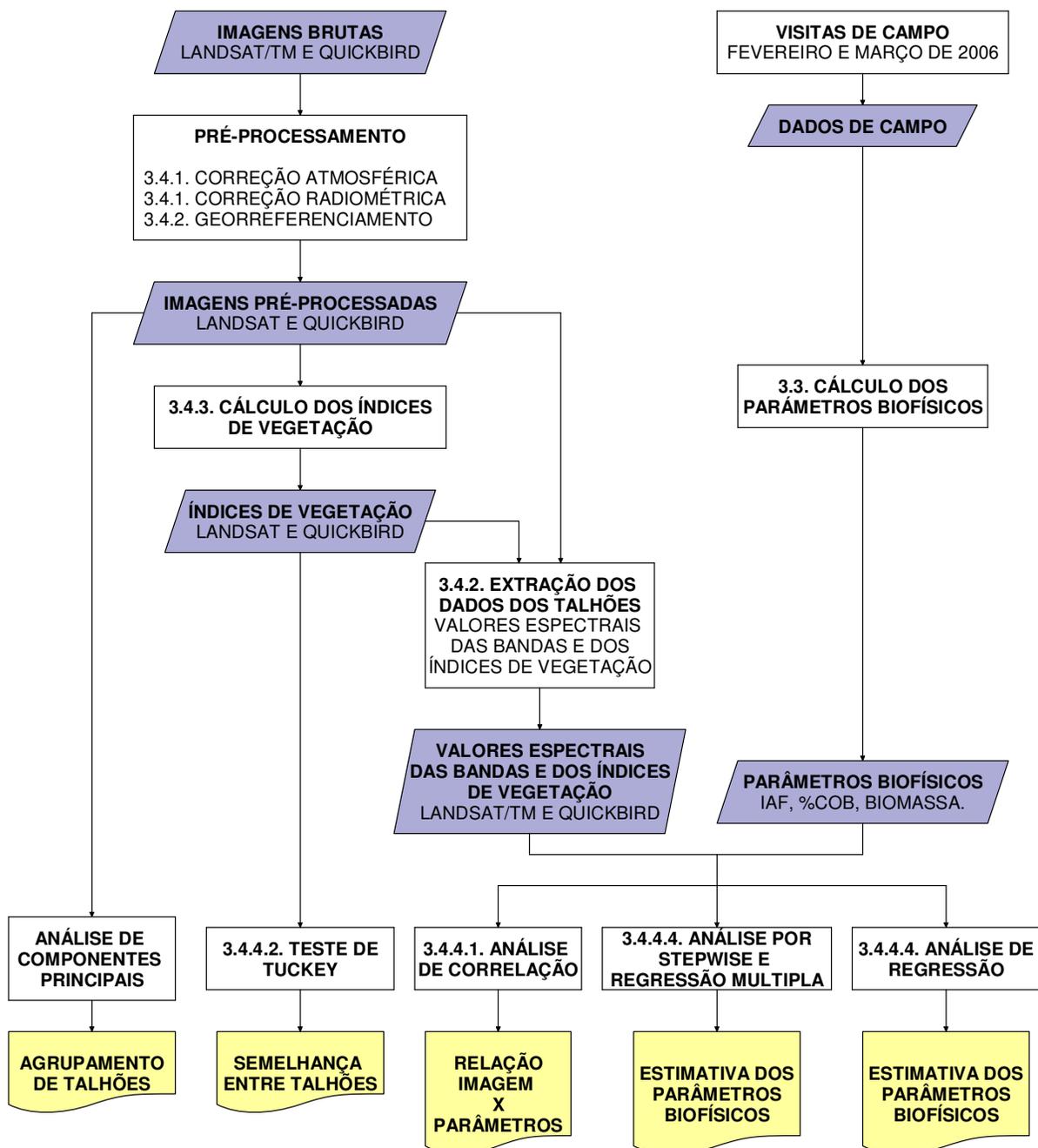


Figura 15: Fluxograma de atividades.

3.4.1. Correção atmosférica e transformação dos valores digitais para valores de refletância

Para a correção radiométrica e atmosférica, utilizou-se o sistema computacional SCORADIS (Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite), desenvolvido por ZULLO JR (1994). Este sistema baseia-se no modelo de transferência radiativa 5S (TANRÉ et al., 1990) e foi desenvolvido a partir de trabalhos experimentais realizados nas condições brasileira de atmosfera e clima. Ele permite a obtenção final de imagens com correções radiométrica e atmosférica. Inicialmente, esse sistema foi desenvolvido para corrigir imagens do TM/LANDSAT, HRV/SPOT e AVHRR/NOAA. Para correção da imagem do QUICKBIRD foram necessárias adaptações no programa original, correspondentes à inclusão das funções-filtro e dos coeficientes de calibração das bandas espectrais do satélite.

As imagens utilizadas para entrada no programa SCORADIS possuíam as seguintes características: QUICKBIRD Multiespectral, 5750 colunas por 2043 linhas, com informações geográficas (datum de referência WGS-84, zona 23S); LANDSAT/TM, 506 colunas por 222 linhas. Os dados necessários para a entrada no sistema SCORADIS são: ângulos zenital e azimutal do sol; ângulos zenital e azimutal de visada; hora, dia, mês e ano de aquisição da imagem; longitude e latitude do centro da cena completa; tipo de modelo atmosférico dos gases; modelo, concentração e espessura ótica dos aerossóis; banda espectral; nome da imagem; número de linhas e colunas e nome da imagem de saída.

Para a correção das imagens dos dois satélites foi utilizada a metodologia descrita por NASCIMENTO (2006), onde a correção atmosférica é realizada a partir da entrada de dados atmosféricos fornecidos pelo sensor MODIS Terra, tais como, espessura ótica dos aerossóis (MOD04), coluna total de vapor d'água (MOD05) e carga total de ozônio (MOD07). As imagens contendo os dados do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) foram coletadas no site da NASA⁵ (*National Aeronautics and Space Administration*) sendo os valores extraídos com a utilização do programa ENVI, versão 3.6. (ENVI, 2008). Os valores extraídos encontram-se detalhados na Tabela 5.

⁵ Obtenção de dados atmosféricos através do endereço eletrônico: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>

Tabela 5: Descrição dos dados obtidos a partir do MODIS para entrada no SCORADIS

	LANDSAT- TM (24/01/2006)	QUICKBIRD (05/02/2006)
Espessura óptica dos aerossóis	0,05	0,09
Coluna total de vapor d'água (g/cm ²)	2,52	2,60
Carga total de ozônio (cm.atm)	0,26	0,26

Na Tabela 6, encontram-se os dados de chuva e temperatura dos dias que antecederam e sucederam a aquisição das imagens do QUICKBIRD e TM/LANDSAT.

Tabela 6: Dados de precipitação e temperatura da estação meteorológica de Franca (SP), com destaque para as datas de aquisição das imagens do TM/LANDSAT e QUICKBIRD, respectivamente.

Datas	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitação (mm)
27/01/2006	32,5	21,9	0,0
26/01/2006	30,6	21,9	0,0
25/01/2006	30,0	20,4	0,0
24/01/2006	29,8	19,8	0,0
23/01/2006	30,0	19,6	0,0
22/01/2006	27,8	18,4	4,0
21/01/2006	26,4	16,8	32,0
08/02/2006	27,5	21,3	8,0
07/02/2006	30,0	22,4	0,0
06/02/2006	30,8	20,4	0,0
05/02/2006	29,9	20,4	0,0
04/02/2006	28,0	18,9	6,0
03/02/2006	28,4	19,3	0,0
02/02/2006	28,0	17,7	28,0

Fonte: www.agritempo.gov.br

3.4.2. Coleta dos valores digitais das imagens referentes aos talhões levantados em campo

As imagens corrigidas do QUICKBIRD e LANDSAT/TM foram recortadas, deixando-se somente a área do retângulo que envolvia a área de estudo. Os 30 talhões levantados em campo foram identificados e selecionados, primeiramente, na imagem do QUICKBIRD. Para selecionar automaticamente os talhões na imagem do TM/LANDSAT, foi necessário o georreferenciamento desta imagem, baseado na imagem do QUICKBIRD. O georreferenciamento foi realizado a partir da escolha da imagem base (imagem que fornece as informações geográficas, ou seja, a do QUICKBIRD) e da imagem a ser corrigida (TM/LANDSAT). Foram identificados pontos de controle localizados nas duas imagens, sendo que, a partir deles, corrigiu-se a imagem do TM/LANDSAT. O erro gerado pela correção (RMS) foi de 0,2679 pixel e, para a re-amostragem por interpolação, foi utilizado o método do vizinho mais próximo. Segundo CRÓSTA (1992), o método do vizinho mais próximo tem as vantagens da rapidez de computação e da preservação dos valores digitais originais da imagem.

A partir da localização exata dos talhões na imagem do TM/LANDSAT, excluíram-se os pixels mais externos (um pixel de toda a borda), minimizando, assim, a influência dos pixels das regiões vizinhas. Foram considerados talhões que, após a eliminação da borda, continham 10 pixels, no mínimo. Segundo LEONARDI (1990), esse valor é suficiente para representar o dossel do cafeeiro. Para a imagem do QUICKBIRD, além da eliminação dos pixels da borda, foram eliminados, também, os pixels dos carregadores, que são muito visíveis nessa imagem. Os valores de refletância real foram coletados para as bandas 1, 2, 3 e 4 do QUICKBIRD e para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM/LANDSAT. O sistema de tratamento de imagens digitais utilizado para a extração desses valores foi o ENVI, versão 4.3 (ENVI, 2008).

3.4.3. Cálculo dos Índices de Vegetação

Para o cálculo dos Índices de Vegetação (IVs), foram utilizadas as imagens do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD, após o pré-processamento, que corrigiu o efeito da atmosfera e transformou os números digitais originais em valores de refletância real (programa SCORADIS), e o georreferenciamento. Os índices foram calculados a partir da ferramenta de matemática de bandas disponível no software ENVI, versão 4.3 (ENVI, 2008). Os índices

calculados para as duas imagens foram SAVI, NDVI, GVI e o RVI (Equações 6, 7, 8 e 9, respectivamente).

- NDVI (*Índice de Vegetação da Diferença Normalizada*): Esse é um dos primeiros e mais utilizados índices de vegetação. Baseia-se na alta absorção e baixa reflexão devida à clorofila na região do vermelho e na alta refletância causada pelas estruturas internas da folha na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Ele pode saturar em vegetações densas com IAF (índice de área foliar) elevado. O valor de NDVI varia de -1 a 1, sendo que, geralmente, em vegetações verdes e saudáveis, o índice varia de 0,2 a 0,8 (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad (6)$$

onde, *IVP* é a refletância na faixa espectral do infravermelho próximo e *V* é a refletância na faixa espectral do vermelho.

- SAVI (*Índice de Vegetação Ajustado ao Solo*): proposto por HUETE (1988), possui a propriedade de minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator *L*, no denominador da equação do NDVI. O fator *L* varia com a característica da refletância do solo (calor e brilho) dependendo da densidade da vegetação que se deseja analisar. Para vegetação muito baixa, é sugerido utilizar o fator de *L* igual a 1,0. Para vegetação intermediária, 0,5, e para densidades elevadas, 0,25. Para este trabalho, foi utilizado o valor de 0,5 que, segundo HUETE (1988), minimiza a influência do solo de fundo para uma grande variação de índices de área foliar.

$$SAVI = \frac{(IVP-V).(1+L)}{(IVP+V+L)} \quad (7)$$

onde, *IVP* é a refletância na faixa espectral do infravermelho próximo, *V* é a refletância na faixa espectral do vermelho e *L* é a constante pra minimizar a influência do solo.

- GVI ou NG (*Índice de Vegetação do Verde*): a relação entre a banda do infravermelho próximo e do verde foi descrita, primeiramente, por TUCKER et al. (1980). Esse índice é muito utilizado na área agrícola, principalmente em imagens de alta resolução espacial, e serve

como indicativo da biomassa, porcentagem de cobertura dos dosséis, área foliar e quantidade de tecido fotossinteticamente ativo.

$$GVI = \frac{IVP}{G} \quad (8)$$

onde, G é a refletância na faixa espectral do verde e IVP é a refletância na faixa espectral do infravermelho próximo.

- RVI (*Índice Razão de Vegetação*): foi apresentado por JORDAN (1969) e é expresso por uma razão simples entre a banda espectral do infravermelho próximo e a banda do vermelho. Utilizada em áreas densamente vegetadas, foi utilizado, inicialmente, para estimar a biomassa e o IAF de florestas tropicais. A quantidade refletida de radiação eletromagnética referente à região do vermelho alcança valores muito pequenos e, conseqüentemente, a razão aumenta sem limites.

$$RVI = \frac{IVP}{V} \quad (9)$$

onde, IVP é a refletância na faixa espectral do infravermelho próximo e V é a refletância na faixa espectral do vermelho.

3.4.4. Análise Estatística

O objetivo principal das análises estatísticas realizadas no trabalho foi avaliar os dados das bandas espectrais e dos índices de vegetação, visando o apoio à discriminação e delimitação dos parâmetros biofísicos de plantios de café levantados em campo.

3.4.4.1. Análise de Correlação

A análise de correlação foi realizada visando conhecer o grau de relacionamento existente entre os dados obtidos através das bandas espectrais e dos índices de vegetação dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD, com os parâmetros biofísicos levantados em campo. Dessa maneira foi possível fazer uma análise preliminar do relacionamento existente entre os dados de campo e os remotos utilizados no trabalho.

Para esta análise de correlação, foram utilizadas as médias dos talhões de cada banda do QUICKBIRD (B1, B2, B3 e B4) e do TM/LANDSAT (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7), além dos quatro índices de vegetação (NDVI, SAVI, RVI e GVI) calculados para cada satélite. Estes valores foram extraídos das imagens empregando-se a versão 4.3 do software ENVI 4.3, sendo utilizados, posteriormente, no programa EXCEL, para determinação do coeficiente de correlação de Pearson (nível de significância igual a 95%) entre os valores remotos e os parâmetros biofísicos de campo.

3.4.4.2. Teste de Tukey

O objetivo da aplicação do teste de Tukey foi analisar a utilização dos quatro índices de vegetação (NDVI, SAVI, GVI e RVI) calculados a partir das imagens do QUICKBIRD e do TM/LANDSAT na diferenciação dos parâmetros biofísicos dos cafezais levantados em campo. Foi utilizado o teste de Tukey para variáveis independentes.

Segundo PIMENTEL-GOMES (1984), para se ter uma informação mais detalhada sobre as médias e poder compará-las duas a duas, de todos os modos possíveis, o teste (ou prova) mais apropriado e, talvez, o melhor, é o teste ou prova de Tukey. Vários autores têm utilizado esse teste para analisar dados de sensoriamento remoto em uso agrícola, tais como, JOAQUIM (1998), RAMIREZ et al. (2003) e ROSA (2007).

Neste trabalho, cada talhão foi considerado como uma variável independente, sendo possível, portanto, a comparação entre as médias de pares de talhões. Para análise das médias foi considerado o nível de significância de 5%, levando-se em consideração a diferença no número de pixels existente em cada talhão.

3.4.4.3. Análise Fatorial por Componentes Principais

Segundo SALGADO (2006) análise fatorial é o termo genérico de uma técnica multivariada, cujo propósito inicial é a redução de dados e sua sumarização. Ela analisa as relações entre as variáveis e tenta explicá-las em termos de suas dimensões subjacentes comuns (fatores). É uma técnica de interdependência, em que não é explicitada uma variável dependente. Duas variações são utilizadas nesta técnica e são chamadas de análise fatorial ou análise de componentes principais. A primeira busca o conhecimento de dimensões subjacentes enquanto que a segunda visa a redução de variáveis às principais (HAIR, 1995). De forma resumida, tanto a análise de componentes principais como a análise fatorial preocupam-se em encontrar índices (de menor dimensão) que representem adequadamente as variáveis originais. Entretanto, a análise fatorial tem, ainda, a possibilidade de formar índices que relacionam, de modo mais eficiente, as variáveis, segundo sua natureza.

Em muitas aplicações na área de sensoriamento remoto, encontram-se, comumente, variáveis (bandas espectrais) que apresentam grande correlação entre si, ou seja, a informação contida em uma banda de interesse pode estar, de certa forma, contida em outra variável, e desse modo, lidar com ambas variáveis pode ser redundante e desnecessário. Nesse caso, torna-se desejável reduzir o número de bandas espectrais, de tal forma que, um novo subconjunto de variáveis (fatores, representando as bandas espectrais) apresente a mesma informação contida em um número menor de “bandas” (fatores). O objetivo principal seria, portanto, descrever a variabilidade original das variáveis coletadas com um número menor de variáveis alternativas, que estão relacionadas com as variáveis originais através de um modelo linear. Em linhas gerais, espera-se que as variáveis originais estejam agrupadas em subconjuntos de novas variáveis, agora não-correlacionadas, sendo que a análise fatorial teria o objetivo de encontrar esses fatores de agrupamento.

Deste modo, nos casos em que há um número grande de variáveis medidas e correlacionadas entre si, seria possível, a partir da análise fatorial, identificar um número menor de novas variáveis não-correlacionadas, que, de alguma forma, sumarizassem as informações principais das variáveis originais. Essas novas variáveis são chamadas de *fatores* ou *variáveis latentes* (MINGOTI, 2005).

A análise fatorial por componentes principais realizada no trabalho teve o objetivo principal de gerar os fatores, a partir dos dados espectrais das bandas dos satélites QUICKBIRD e LANDSAT, a serem utilizados para avaliar as similaridades ou diferenças dos diferentes tipos de talhões definidos de acordo com os parâmetros biofísicos levantados em campo.

Para a realização da análise, foram consideradas as bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 do satélite TM/LANDSAT e as bandas 1, 2, 3 e 4 do QUICKBIRD, com valores de refletância real, em porcentagem (conforme apresentado nas Tabelas 9 e 10 do item 4.1). Os valores das ROIS (áreas de interesse selecionadas nas imagens dos dois satélites, que neste caso referem-se aos talhões levantados em campo, descritos no item 3.3) selecionadas nos dois satélites foram exportados para o programa estatístico Minitab14 (MINITAB, 1998), onde foi feita a análise multivariada fatorial por componentes principais, com rotação ortogonal varimax para estimação dos fatores. Após o cálculo dos fatores, foi feita a análise de correlação entre os mesmos e as bandas espectrais dos dois satélites para obter a influência de cada banda sobre cada fator calculado. Em seguida, foi feita a análise de agrupamento por classificação (ou cluster), ou *clusterização*, que tem o objetivo principal de dividir os elementos de uma amostra, ou população, em grupos de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às variáveis que neles foram medidas (ou características), e os elementos em grupos diferentes sejam heterogêneos em relação a estas mesmas características. Essas características, neste trabalho, são os fatores (FATOR 1 e FATOR 2) calculados conforme descrição acima.

Cabe ressaltar que, na literatura estatística, existem inúmeras técnicas para lidar com problemas de agrupamento. A utilizada nesse trabalho é uma técnica hierárquica aglomerativa de *clusterização*. Esta técnica parte do princípio que, no início do processo de agrupamento, cada elemento do conjunto de dados observado (no caso, os talhões) é considerado como sendo um conglomerado isolado. Na medida em que o processo de agrupamento ocorre, os

elementos amostrais vão sendo agrupados, formando, assim, novos conglomerados até o momento no qual todos os elementos considerados estão num único grupo. Portanto, no estágio inicial do processo de agrupamento, cada talhão é considerado como um *cluster* de tamanho 1 e, no último estágio de agrupamento, tem-se apenas um único *cluster* constituído de todos os talhões. De acordo com MINGOTI (2005), em termos de variabilidade, no estágio inicial de agrupamento, tem-se a partição com a menor dispersão interna possível, já que todos os conglomerados têm um único elemento. No estágio final, tem-se a maior dispersão interna possível, já que todos os elementos da amostra se encontram em um único cluster. Em cada estágio do processo de agrupamento, os grupos são comparados através de alguma medida de similaridade definida previamente.

Devido à propriedade de hierarquia, é possível construir um gráfico chamado dendograma que representa a árvore ou a história de agrupamento. O dendograma é um gráfico em forma de árvore no qual a escala vertical indica o nível de similaridade e a escala horizontal marca os elementos amostrais numa ordem conveniente relacionada à história de agrupamento. As linhas verticais, que partem dos elementos amostrais (talhões), têm altura correspondente ao nível em que os elementos foram considerados semelhantes.

A escolha do número final de grupos em que o conjunto de dados deve ser repartido é subjetiva. Existem alguns métodos que podem ser utilizados para auxiliar na determinação desse número, sendo que, para este trabalho, foi utilizado o número de grupos que estavam associados à partição mais natural possível dos elementos que foram comparados e agrupados. Como, para cada talhão, existem várias medidas dos fatores previamente descritos, foi obtida, então, uma medida resumo para essas observações, de forma a resultar em 30 medidas, sendo cada uma representativa para seu respectivo talhão. Essas medidas de resumo escolhidas foram a média e a mediana, por talhão. Ou seja, para cada um dos 30 talhões foram obtidas as médias e as medianas dos fatores. A partir dessas 30 medidas, aplicou-se o método de agrupamento aglomerativo, descrito acima.

3.4.4.4. Análise de Regressão

A idéia da regressão é obter uma equação para um dado experimento, associado a um fenômeno (físico, químico ou biológico, por exemplo) ou a relações entre grandezas (tais como temperatura, latitude, pressão e tempo). Em muitos casos, é possível utilizar a equação

de uma reta, dada por $y = ax + b$, sempre que os dados obtidos (em um experimento, por exemplo) estiverem relacionados de forma aproximadamente linear.

Para avaliar os dados medidos em campo e os obtidos através das bandas e índices de vegetação calculados para os dois satélites, foi empregada a análise de regressão *Stepwise*. A regressão *Stepwise* é uma ferramenta de automatização utilizada nos estágios exploratórios da construção de modelos, servindo para identificar um conjunto de preditores (variáveis independentes) que são significativos a certo nível de probabilidade definido. O processo adiciona, sistematicamente, a variável mais significativa ou remove a variável menos significativa para cada caso analisado.

A partir das variáveis independentes separadas com a análise *stepwise*, para cada parâmetro biofísico avaliado, foram gerados modelos lineares de regressão múltipla. Na regressão múltipla, uma variável dependente (parâmetros biofísicos, neste trabalho) foi relacionada a mais de uma variável independente (bandas espectrais e índices de vegetação), utilizando o programa computacional MINITAB (MINITAB, 1998). Os dados utilizados como entrada neste programa foram as bandas espectrais TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 do satélite LANDSAT, as bandas 1, 2, 3 e 4 do QUICKBIRD, os índices NDVI, SAVI, GVI e RVI dos dois satélites, além dos valores médios dos parâmetros biofísicos levantados em campo. Os talhões utilizados para as análises de regressão estão na Tabela 7. Os talhões E2, E3, E4, F2 e G2 não foram utilizados nas análises por serem considerados como repetições de E1, F1 e G1, respectivamente.

Tabela 7: Códigos (nomes) dos 25 talhões utilizados nas análises de regressão

2	3	4	6	A	AC	B	D	E1	F1
G1	H	I	J	L	O	P	Q	R	S
T	U	V	X	Y					

Apesar das análises de regressão linear ajustar-se bem para vários tipos de dados, há muitos casos nas áreas biológica e agrícola em que a relação não é linear e, portanto, a melhor representação para o fenômeno estudado não é uma reta (ZULLO JR e ARRUDA, 1986). Por definição, um modelo de regressão é não-linear se, pelo menos, um dos seus parâmetros aparecem de forma não-linear. Um modelo de regressão não-linear é considerado “intrinsecamente linear” se este pode ser reduzido a um modelo linear por meio de uma parametrização apropriada. Pode-se, ainda, utilizar o termo “intrinsecamente linear” para

referir-se a modelos que podem ser linearizados através de alguma transformação (MAZUCHELI e ACHCAR, 2002).

Foi feita, neste trabalho, a análise de regressão que emprega equações não-lineares, visando descrever o comportamento dos parâmetros biofísicos dos plantios de café com base nos dados espectrais obtidos através das imagens do TM/LANDSAT e QUICKBIRD. Para tanto, utilizou-se o programa AJUSTE, desenvolvido por ZULLO JR e ARRUDA (1986), que reúne, em um único programa, 17 modelos de equações bem conhecidas na literatura e com amplas aplicações nos campos da biologia e agricultura. Os modelos de equações utilizadas no programa AJUSTE, e as respectivas transformações realizadas, são apresentados na Tabela 8. Foram utilizados os mesmos 25 talhões, descritos na Tabela 7, processados no programa MINITAB na análise linear.

Tabela 8: Equações utilizadas na linearização das regressões empregadas no programa AJUSTE.

Modelo	Equações de Ajuste
Senoidal	$y = a + b * \text{sen}(0,017453 * x)$
Exponencial	$\ln y = \ln a + bx$
Recíproca	$\ln y = \ln a - b/x$
Hiperbólica	$1/y = 1/a + b/ax$
Hiperbólica retangular	$1/y = a + bx$
Monomolecular	$\ln(1 - y/c) = \ln a - bx$
Logística	$\ln(c/y - 1) = \ln a - bx$
Logística negativa	$\ln(c/y - 1) = -b * \ln a + b * \ln x$
Gompertz	$\ln(\ln(c/y)) = \ln a - bx$
Alométrica linear	$\log y = \log a + b * \log x$
Alométrica curvilínea	$\log y = \log a + b * \log x + c(\log x)^2$
Quadrática	$y = a + bx + cx^2$
Cúbica	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$
Exponencial quadrática	$\ln y = \ln a + bx + cx^2$
Exponencial cúbica	$\ln y = \ln a + bx + cx^2 + dx^3$
Normal	$\ln y = \left(\ln a - z^2/s^2\right) + \left(2z/s^2\right)x - \left(1/s^2\right)x^2$

Para avaliar os resultados obtidos a partir das análises de regressão, foram selecionados oito talhões com plantios de café localizados dentro da mesma área de estudo. Esses talhões foram escolhidos ao acaso e possuem distribuição espacial representativa para a área de trabalho, conforme apresentado na Figura 16.

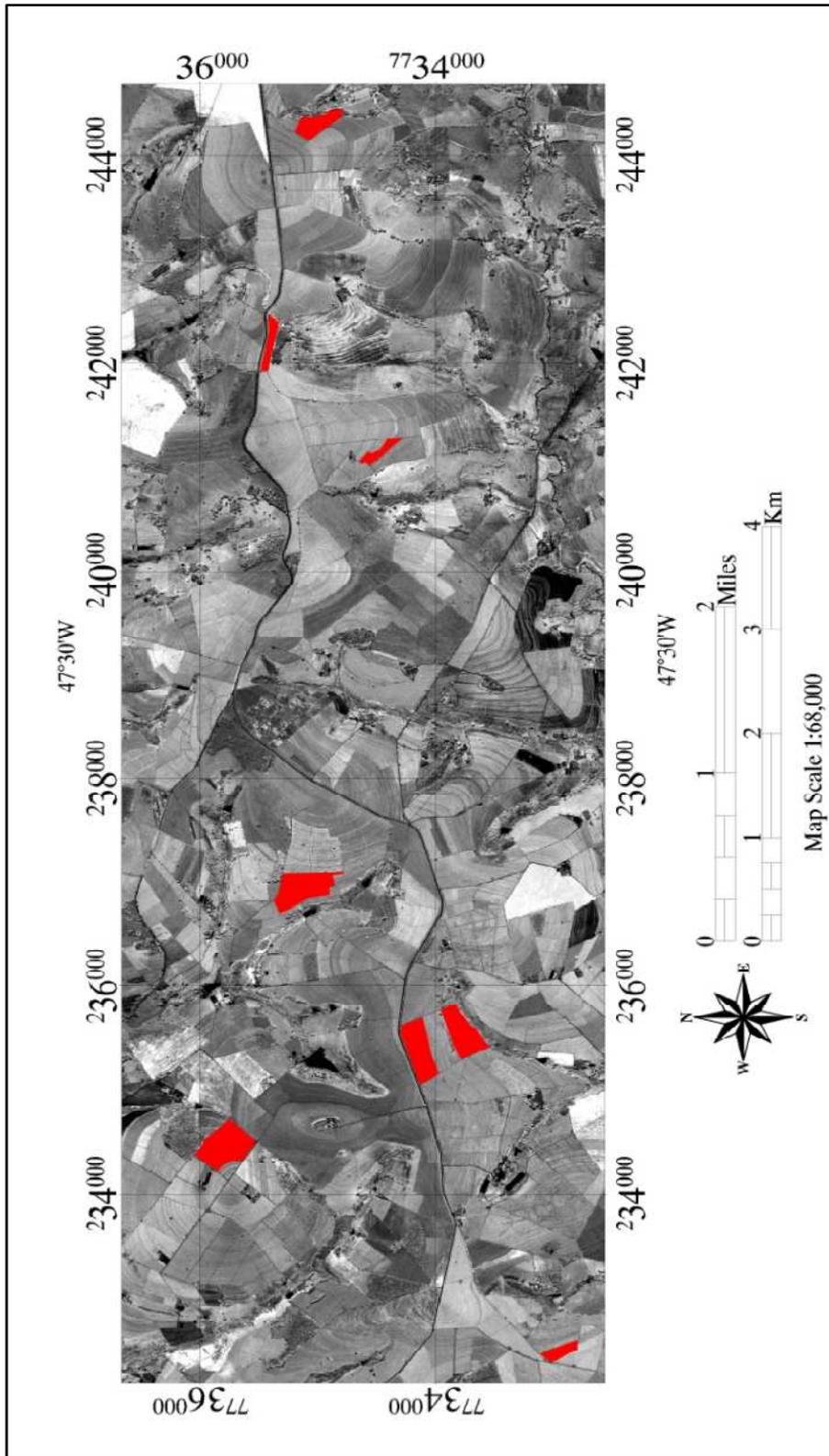


Figura 16: Imagem do satélite QUICKBIRD (Banda 4) mostrando os talhões seleccionados para validação das equações obtidas através das análises de regressão.

Na Tabela 9, encontram-se os dados dos talhões selecionados para validação das equações, mostrados na Figura 16. Os valores dos parâmetros biofísicos dos talhões testes foram obtidos junto com os dados dos outros talhões, durante o levantamento realizado em campo.

Tabela 9: Talhões separados para avaliação das equações de regressão.

Talhão	Variedade	EL (m)	EP (m)	Diam (m)	Alt (m)	IAF1 (m ² .m ⁻²)	%Cob (%)	Dens (plantas/ha)	Rugos (m)	Biom (ton/ha)
T1	Catuaí	1,75	0,70	1,68	2,11	4,16	96,23	8163,27	0,29	0,93
T2	Catuaí	3,5	0,70	1,34	1,82	2,65	38,37	4081,63	0,47	0,89
T3	MN	3,5	1,00	2,05	2,13	5,42	58,57	2857,14	0,40	0,93
T4	MN	3,5	1,00	1,94	2,15	5,08	55,29	2857,14	0,50	0,94
T5	MN	3,8	1,00	2,47	2,16	7,05	65,03	2631,58	0,24	0,94
T6	MN	3,25	1,00	1,74	2,26	4,63	53,45	3076,92	0,33	0,95
T7	MN+Cat.	2,00	1,00	1,79	1,91	4,07	89,00	5000,00	0,44	0,90
T8	MN	3,8	1,00	1,93	1,99	4,71	50,82	2631,58	0,25	0,92

Legenda: MN (variedade mundo novo), EL (espaçamento entre linhas de plantio), EP (espaçamento entre plantas na linha de plantio), Diam (diâmetro das plantas), Alt (altura), IAF (índice de área foliar), %Cob (porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas), Biom (biomassa), Dens (densidade populacional), Rugos (rugosidade) e Biom (biomassa).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados das Análises de Correlação

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os valores médios de refletância das bandas espectrais dos dois satélites, LANDSAT/TM e QUICKBIRD, e os valores médios dos índices NDVI, SAVI, RVI e GVI, utilizados como entrada na análise de correlação. Os dados dos parâmetros biofísicos, também utilizados como entrada, encontram-se descritos na Tabela 4 do item 3.3.

Tabela 10: Tabela com valores médios de refletância real das bandas espectrais do TM/LANDSAT e índices de vegetação calculados a partir delas.

Talhão	B1(%)	B2(%)	B3(%)	B4(%)	B5(%)	B7(%)	NDVI	SAVI	RVI	GVI
2	2,6	5,3	4,7	35,0	19,7	9,6	0,8	1,1	7,5	6,6
3	3,3	6,2	6,2	32,7	23,2	12,1	0,7	1,0	5,3	5,3
4	3,2	6,6	6,9	33,1	23,2	12,7	0,7	1,0	4,9	5,1
6	2,4	5,1	4,0	37,5	18,0	7,9	0,8	1,2	9,8	7,3
A	2,2	4,8	3,7	37,7	17,1	7,1	0,8	1,2	10,4	8,1
Ac	2,0	4,1	3,0	38,5	16,1	6,1	0,9	1,3	13,0	9,5
B	2,5	4,9	4,0	41,6	18,8	7,6	0,8	1,2	10,6	10,7
D	2,8	5,9	5,4	35,7	20,5	9,8	0,7	1,1	6,8	6,2
E1	2,9	6,0	6,1	34,9	21,2	10,4	0,7	1,1	5,8	5,9
E2	2,1	4,7	4,1	34,4	17,8	8,3	0,8	1,2	8,5	7,4
E3	2,6	5,6	5,0	36,0	19,3	8,9	0,8	1,1	7,5	6,5
E4	2,3	5,3	3,7	40,9	18,0	7,2	0,8	1,2	11,3	7,8
F1	2,9	6,9	6,0	35,9	22,1	10,9	0,7	1,1	6,1	5,9
F2	2,8	5,9	5,9	35,4	22,1	11,1	0,7	1,1	6,1	6,0
G1	2,5	5,2	4,5	35,0	19,5	9,2	0,8	1,2	7,9	6,9
G2	1,8	4,1	3,2	35,9	16,3	6,3	0,8	1,3	11,6	8,9
H	2,5	5,4	4,5	35,5	19,5	8,9	0,8	1,6	8,0	6,6
I	3,0	5,9	6,4	30,9	20,7	10,6	0,7	1,0	4,9	5,3
J	2,4	5,0	4,7	32,3	17,8	8,4	0,7	1,1	7,0	6,4
L	3,0	6,2	6,1	32,9	22,4	11,6	0,7	1,0	5,4	5,3
O	2,0	4,7	3,3	34,1	16,5	6,8	0,8	1,2	10,6	7,2
P	2,5	5,4	4,6	35,5	19,7	9,1	0,8	1,2	7,9	6,6
Q	2,6	5,5	4,8	38,7	20,0	9,2	0,8	1,2	8,3	7,0
R	2,5	5,4	4,0	38,3	18,5	7,8	0,8	1,2	9,8	7,1

continua

continuação

Talhão	B1(%)	B2(%)	B3(%)	B4(%)	B5(%)	B7(%)	NDVI	SAVI	RVI	GVI
S	2,4	5,3	3,7	38,6	17,8	7,3	0,8	1,2	10,6	7,3
T	2,1	4,9	3,5	36,8	17,3	7,1	0,8	1,2	10,5	7,5
U	2,6	5,7	4,5	36,8	20,1	9,0	0,8	1,2	8,2	6,5
V	3,9	8,2	8,1	36,8	23,7	12,8	0,6	1,0	4,7	4,6
X	3,6	7,3	6,7	36,6	22,8	11,7	0,7	1,0	5,5	5,1
Y	2,0	4,5	3,3	34,1	15,6	6,5	0,8	1,2	10,5	7,6

Tabela 11: Tabela com valores médios de refletância real das bandas espectrais do QUICKBIRD e índices de vegetação calculados a partir delas.

Talhão	B1(%)	B2(%)	B3(%)	B4(%)	NDVI	SAVI	RVI	GVI
2	1,8	6,2	5,8	27,7	0,7	0,4	5,0	4,5
3	2,0	7,0	6,2	28,7	0,6	0,4	4,7	4,1
4	2,2	7,3	6,9	27,9	0,6	0,4	4,1	3,8
6	1,4	6,0	4,8	28,8	0,7	0,4	6,1	4,8
A	1,7	6,0	5,8	26,8	0,6	0,4	4,7	4,5
Ac	0,9	4,7	3,6	30,4	0,8	0,5	8,5	6,5
B	2,0	6,8	6,5	30,3	0,6	0,4	4,7	4,5
D	1,5	6,2	4,8	30,1	0,7	0,4	6,3	4,9
E1	2,0	6,8	6,8	25,7	0,6	0,4	3,8	3,8
E2	1,1	5,1	4,1	27,7	0,7	0,4	6,8	5,5
E3	1,8	6,5	6,3	26,7	0,6	0,4	4,4	4,1
E4	1,6	6,4	5,7	29,6	0,7	0,4	5,2	4,7
F1	1,7	6,6	5,6	30,1	0,7	0,4	5,5	4,6
F2	1,6	6,4	5,2	29,7	0,7	0,4	5,7	4,6
G1	1,3	5,6	4,7	28,7	0,7	0,4	6,2	5,2
G2	0,9	4,8	3,8	27,9	0,8	0,4	7,5	5,9
H	1,6	6,5	5,4	28,8	0,7	0,4	5,5	4,5
I	1,8	6,4	6,4	23,7	0,6	0,3	3,8	3,7
J	1,6	6,0	5,7	25,3	0,6	0,4	4,5	4,3
L	2,0	7,1	6,5	27,9	0,6	0,4	4,3	3,9
O	1,3	5,8	4,4	28,7	0,7	0,4	6,6	4,9
P	1,5	6,2	4,8	31,4	0,7	0,5	6,7	5,0
Q	1,6	6,2	5,0	31,3	0,7	0,5	6,3	5,1
R	1,6	6,4	4,7	32,1	0,7	0,5	6,9	5,1
S	1,4	6,2	4,4	32,7	0,8	0,5	7,4	5,3
T	1,5	6,1	4,4	31,3	0,8	0,5	7,2	5,2
U	1,6	6,6	4,8	32,5	0,7	0,5	6,8	5,0
V	3,8	10,1	11,5	25,6	0,4	0,2	2,3	2,6
X	2,4	7,8	7,0	32,6	0,6	0,4	4,7	4,2
Y	1,2	5,3	4,3	25,9	0,7	0,4	6,2	5,0

Na Tabela 12, encontram-se os resultados das correlações entre as bandas e os índices calculados, nas imagens dos satélites LANDSAT/TM e QUICKBIRD, e os parâmetros biofísicos dos 30 talhões amostrados em campo.

Tabela 12: Valores de correlação significativos (para $\alpha=5\%$) entre as bandas espectrais, índices de vegetação dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD e parâmetros biofísicos dos plantios de café.

Tipo de Dado	EL (m)	EP (m)	DIÂM (m)	ALT (m)	IAF (m.m ⁻²)	COB (%)	DENS (pl/ha)	RUG (m)	BIOM (t/ha)
TM1	-	-	-0,466	-0,549	-0,505	-0,604	-	-	-0,615
TM2	-	-	-0,429	-0,507	-0,436	-0,630	-	-	-0,607
TM3	-	-	-	-0,475	-0,395	-0,494	-	-	-0,537
TM4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TM5	-	-	-	-0,412	-	-0,461	-	-	-0,439
TM7	-	-	-	-	-0,363	-	-	-	-0,443
NDVI_TM	-	-	-	0,384	-	0,407	-	-	0,429
SAVI_TM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RVI_TM	-	-	-	-	-	0,421	-	-	-
GVI_TM	-	-	-	-	-	0,451	-	-	-
QUICK1	-	-	-0,491	-0,591	-0,500	-0,662	-	-	-0,730
QUICK2	-	-	-0,447	-0,529	-0,439	-0,679	-	-	-0,670
QUICK3	-	-	-	-	-0,382	-	-	-	-
QUICK4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NDVI_QUICK	-	-	-	0,516	-	0,427	-	-	0,621
SAVI_QUICK	-	-	-	0,442	-	-	-	-	0,535
RVI_QUICK	-	-	-	0,376	-	0,392	-	-	0,436
GVI_QUICK	-	-	-	-	-	0,524	-	-	0,450

Legenda: EL é o espaçamento entre linhas de plantio, EP é o espaçamento entre plantas na linha de plantio, DIAM é o diâmetro das plantas, ALT é a altura, IAF é o índice de área foliar, %COB é a porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas, DENS é a densidade populacional, RUG é a rugosidade e BIOM é a biomassa.

Como base para interpretação dos resultados da análise de correlação, utilizou-se a classificação proposta por SANTOS (2007), descrita na Tabela 13.

Tabela 13: Classificação dos valores dos coeficientes de correlação linear

Coeficientes de correlação	Interpretação
$r = 1; r = -1$	perfeitamente positiva/negativa
$0,8 \leq r < 1; -0,8 \leq r < -1$	fortemente positiva/negativa
$0,5 \leq r < 0,8; -0,5 \leq r < -0,8$	moderada positiva/negativa
$0,1 \leq r < 0,5; -0,1 \leq r < -0,5$	fraca positiva/negativa
$0 \leq r < 0,1; 0 \leq r < -0,1$	ínfima positiva/negativa
0	nula

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que nenhum parâmetro biofísico apresentou correlação significativa forte com as bandas e com os índices de vegetação dos satélites, mas correlações significativas fracas ou moderadas. Pode-se verificar que todas as correlações significativas existentes entre as bandas do visível (tanto para o QUICKBIRD como para o TM/LANDSAT) e os parâmetros biofísicos são negativas, isto é, com o aumento da quantidade de massa verde ocorre um decréscimo no valor da refletância. Este fato é provocado, provavelmente, pelo aumento da quantidade de pigmentos foliares, responsáveis pela elevada absorção da radiação eletromagnética no visível, que ocorre quando há elevação da quantidade de massa verde nos plantios de café. Outro fator responsável por este comportamento pode ser o possível aumento da quantidade de sombras provocado pelo aumento da fitomassa.

De forma geral, considerando-se os valores dos coeficientes de correlação e a quantidade de correlações significativas para cada parâmetro biofísico avaliado, os resultados foram muito próximos nos dois sistemas sensores, não havendo uma diferença nítida de um em relação ao outro. Uma correlação que apresentou um comportamento um pouco distinto desse, com diferenças mais importantes em relação aos dois sistemas, e que deve ser destacada, foi a da Biomassa com as bandas 1 do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD, com coeficientes iguais a -0,615 e -0,730, respectivamente. Em quatro parâmetros (EL, EP, DENS e RUG), não houve nenhuma correlação significativa. Nos outros cinco, o número de correlações significativas e o valor dos coeficientes de correlação ficaram muito próximos entre si. Apesar disso, é importante ressaltar que embora os índices de vegetação tenham sido definidos, originariamente, com base em satélites de média e baixa resolução espacial, os resultados obtidos indicam que eles foram válidos e tiveram um desempenho semelhante quando calculados a partir de um satélite de alta resolução espacial, como é o QUICKBIRD.

É possível verificar que os valores de refletância da banda 4 (infravermelho próximo), para os dois satélites, não apresentaram correlação significativa com nenhum parâmetro, inclusive a %COB. Resultados semelhantes a este para a %COB foram obtidos por COVRE (1989) e LEONARDI (1990) que avaliaram plantios de citrus e café, respectivamente. Segundo LEONARDI (1990), a densidade da massa foliar verde, intensamente relacionada com o IAF, influencia mais a resposta na banda 4 que a porcentagem de cobertura do solo pelas plantas de café. Pelos resultados apresentados, apesar do IAF

possuir correlações significativas fracas com algumas bandas analisadas, isto não aconteceu com a banda 4, tanto na imagem do QUICKBIRD como na do TM/LANDSAT.

COVRE (1989), analisando a relação entre a banda 4 do TM/LANDSAT e as características biofísicas de citrus, encontrou correlação significativa fraca (-0,216). Como justificativa, o autor argumenta que ocorre um aumento da proporção de sombras no talhão à medida que o porte das árvores aumenta e essas sombras influenciam significativamente no sinal registrado pelo sensor alterando, por consequência, a refletância do talhão. Portanto, nas demais porções de espectro eletromagnético, a diminuição da refletância causada pelo aumento das sombras é diretamente proporcional ao decréscimo da refletância causado pelo aumento de fitomassa. Já, na banda 4 do TM, a diminuição da refletância em função do aumento de sombras se contrapõem ao aumento da refletância causado pelo aumento da fitomassa.

Para avaliar a possível influência do sombreamento na resposta da banda 4 dos dois satélites, o parâmetro %COB foi agrupado em classes de cobertura, sendo que os resultados podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores de correlação ($\alpha=5\%$) entre as bandas 4 (infravermelho próximo) dos satélites TM/LANDSAT e QUICKBIRD e quatro níveis distintos para a %COB.

Satélite	%COB			
	14 a 47%	14 a 50%	14 a 55%	14 a 96%
QUICKBIRD	0,5288	0,6456	0,4101	-0,1335
TM/LANDSAT	0,2815	0,5054	0,3667	-0,0592

Pode-se verificar, na Tabela 14, que quando se utilizam valores de cobertura de até 50%, ocorre correlação positiva e significativa com as bandas do infravermelho próximo, para os dois satélites, com coeficientes maiores para o QUICKBIRD. A %COB com valores entre 0 e 50% foi a que apresentou os valores maiores para o coeficiente de correlação nos dois satélites. Esse resultado confirma que a quantidade de sombras existentes nos talhões influencia de maneira significativa a refletância da banda 4, pois quanto maior a %COB, maior a quantidade de fitomassa na área e, conseqüentemente, maior a quantidade de sombras. VIEIRA et al. (2003), estudando a relação dos parâmetros culturais de cafezais com sua resposta espectral, também encontrou valores de correlação mais altos (0,61) com a banda 4 do TM, quando a porcentagem de cobertura das plantas era inferior a 50%.

4.2. Resultados do teste de Tukey para os Índices de Vegetação

Para discutir os resultados gerados a partir do teste de Tukey, os valores dos dados biofísicos dos talhões foram agrupados em classes, conforme apresentado na Tabela 14. Segundo SPIEGEL (1977), o fato de se trabalhar com dados agrupados tornam mais claras e evidentes as relações essenciais existente entre os mesmos. Os dados biofísicos considerados foram os que apresentaram maior correlação com os índices de vegetação calculados (Altura, %Cob e Biomassa), conforme Tabela 11 no item 4.1.

Tabela 15: Classes de agrupamento dos dados biofísicos que apresentaram maior correlação com os índices de vegetação.

Talhão	Altura (m)	%Cob	Biomassa (ton/ha)
2	3	2	3
3	3	2	3
4	5	3	5
6	4	3	4
A	4	3	5
Ac	3	4	3
B	4	2	4
D	3	2	4
E1	4	3	4
E2	4	3	4
E3	4	3	4
E4	4	3	4
F1	4	2	4
F2	4	2	4
G1	4	4	4
G2	4	4	4
H	4	3	4
I	4	2	4
J	4	3	4
L	3	3	4
O	4	2	4
P	4	3	4
Q	4	2	4
R	4	2	4
S	5	2	5
T	5	2	5
U	4	2	5
V	1	1	1
X	1	1	1
Y	5	2	5

A altura foi agrupada em cinco classes, com diferença de 0,5m entre elas, sendo que os limites inferior e superior foram definidos de acordo com a menor e maior altura das plantas encontradas nos talhões analisados:

- classe 1: 0,5 a 1,0m
- classe 2: 1,0 a 1,5m
- classe 3: 1,5 a 2,0m
- classe 4: 2,0 a 2,5m
- classe 5: > 2,5m

A porcentagem de cobertura foi agrupada em quatro classes, com diferença de 30% entre elas, sendo que os limites inferior e superior foram escolhidos de acordo com a menor e maior porcentagem de cobertura encontrada nos talhões analisados:

- classe 1: 10% a 30%
- classe 2: 30% a 60%
- classe 3: 60% a 90%
- classe 4: > 90%

A quantidade de biomassa foi agrupada em cinco classes, com diferença de 0,05ton/ha entre elas, sendo que os limites inferior e superior foram estabelecidos de acordo com a menor e maior quantidade encontrada nos talhões analisados:

- classe 1: < 0,8t/ha
- classe 2: 0,8 a 0,85t/ha
- classe 3: 0,85 a 0,90t/ha
- classe 4: 0,90 a 0,95t/ha
- classe 5: > 0,95t/ha

De acordo com o agrupamento realizado, verificou-se que 55 pares de talhão possuem as mesmas características (Tabela 16), de um total de 435 pares possíveis, considerando os 30 talhões avaliados.

Tabela 16: Pares de talhões (55), com características semelhantes em campo, representados pelo símbolo (*), de acordo com agrupamento realizado.

	2	3	6	B	E1	E2	E3	E4	F1	F2	G1	G2	H	I	J	O	P	Q	R	S	T	V	X	Y
2		*																						
3																								
B									*	*				*		*		*	*					
6					*	*	*	*					*		*		*							
E1						*	*	*					*		*		*							
E2							*	*					*		*		*							
E3								*					*		*		*							
E4													*		*		*							
F1										*				*		*		*	*					
F2														*		*		*	*					
G1												*												
G2																								
H															*		*							
I																*		*	*					
J																	*							
O																		*	*					
P																								
Q																			*					
R																								
S																					*			*
T																								*
V																							*	
X																								
Y																								

Vale ressaltar aqui que o objetivo dessa análise foi verificar se, através dos índices de vegetação utilizados, os talhões com características biofísicas semelhantes em campo, através do agrupamento realizado e descrito na Tabela 15, foram identificados. Na Tabela 16, encontram-se os resultados do teste de Tukey para a imagem do TM/LANDSAT, avaliada a partir do índice de vegetação NDVI. Ao todo, o teste encontrou 98 pares de talhões (22,5% das 435 combinações de pares possíveis) sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade. Dos 98 pares encontrados, 17 possuíam características semelhantes, de acordo com o agrupamento realizado e apresentado na Tabela 17, o que equivale a 30,9% de concordância.

Tabela 17: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem do índice de vegetação NDVI do satélite TM/LANDSAT.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
2	E2, E3, G1, H, J, P, Q, U
3	L, X
4	I, V
6	A, B, E2, G2, O, R, S, T, Y
A	B, E4, G2, O, R, S, T, Y
AC	E4, G2
B	E4, G2, O, R, S, T, Y
D	F2, J
E1	F1, F2, L, X
E2	E3, G1, H, J, P, Q, R, U
E3	G1, J, P
E4	G2, O, R, S, T, Y
F1	F2, J, L
F2	J, L, X
G1	H, J, P, Q, U
G2	O, R, S, T, Y
H	J, P, Q, U
J	P, Q, U
L	X
O	R, S, T, Y
P	Q, U
Q	U
R	S, T, Y
S	T, Y
T	Y

O teste de Tukey, realizado com valores do índice SAVI calculado com dados da imagem TM/LANDSAT, teve o mesmo resultado encontrado para o índice NDVI, sendo que os 17 talhões que possuíam características semelhantes no NDVI, também foram identificados neste caso, conforme descrito na Tabela 18. A única diferença é que na, imagem do índice SAVI, a quantidade total de talhões sem diferença estatística entre suas médias, ao nível de 5% de probabilidade, foi menor, totalizando 92 pares (21,2% das 435 combinações de pares possíveis).

Tabela 18: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação SAVI do satélite TM/LANDSAT.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
2	E2, E3, G1, H, J, U
3	L, X
4	I, V
6	A, E2, G2, O, Y
A	B, E4, G2, O, R, S, T, Y
AC	E4, G2,
B	E4, G2, O, R, S, T, Y
D	F2, J
E1	F1, F2, L
E2	E3, G1, H, J, P, Q, R, U
E3	G1, J, P
E4	G2, O, R, S, T, Y
F1	F2, J, L
F2	J, L, X
G1	H, J, P, Q, U
G2	O, R, S, T, Y
H	J, P, Q, U
J	P, Q, U
L	X
O	R, S, T, Y
P	Q, U
Q	U
R	S, T, Y
S	T, Y
T	Y

O teste de Tukey para o índice GVI, imagem do LANDSAT/TM, encontrou 361 pares de talhões (83,0% das 435 combinações de pares possíveis) sem diferença estatística

significativa, ao nível de 5% de probabilidade. Apesar de ser o índice que mais gerou acertos (89%), na comparação de pares de talhões sem diferença estatística entre suas médias e pares de talhões semelhantes em campo, pode-se dizer que o GVI, gerado a partir da imagem TM/LANDSAT, apresentou tendência de generalizar as comparações como não tendo diferença significativa entre suas médias. Esse tipo de generalização acaba classificando um grande número de talhões sem semelhança em campo como semelhantes a partir da imagem.

Na Tabela 19, são apresentados os talhões com diferença estatística entre suas médias encontrados a partir da análise da imagem GVI, pois a quantidade de talhões sem diferença estatística entre suas médias é muito grande.

Tabela 19: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação GVI do satélite LANDSAT/TM.

Talhão	Talhões <u>com</u> diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
2	AC, Q
3	AC, B, G1, Q, Y
4	A, AC, B, G1, Q, Y
6	AC, Q,
A	AC, Q,
AC	B, B, D, E1, E2, E3, E4, F1, F2, G1, H, I, J, L, O, P, Q, R, S, T, U, V, X, Y
B	D, H, I, Q, V, X
D	Q, Y
E1	Q, Y
E2	Q
E3	Q, Y
E4	Q,
F1	Q
G1	I, Q, X
G2	Q
H	Q, Y
I	Q, Y
O	Q
P	Q
Q	R, S, T, U, V, X, Y
V	Y
X	Y

Na Tabela 20, é apresentado o resultado do índice de vegetação RVI para pares de talhões sem diferença estatística entre suas médias ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados encontrados para o índice RVI também são parecidos com os encontrados para os índices SAVI e NDVI. A quantidade total de pares de talhões sem diferença estatística significativa entre suas médias, ao nível de 5% de probabilidade, foi de 108 (24,8% das 435 combinações de pares possíveis), sendo que 19 deles possuíam características semelhantes, de acordo com o agrupamento realizado, dando um total de 34,5% de concordância. Os dois únicos pares de talhões diferentes, dos encontrados para o NDVI e SAVI, identificados pela análise do RVI foram o E1-J e F2-I.

Tabela 20: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação RVI do satélite TM/LANDSAT.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
2	E2, E3, G1, H, J, P, Q, U
3	4, E1, F1, F2, I, L, V, X
4	F2, I, L, V, X
6	A, E2, R, T
A	B, E4, G2, O, R, S, T, T, Y
B	E4, G2, O, R, S, T, Y
D	F1, F2, J
E1	F1, F2, J, L, X
E2	E3, G1, H, J, P, Q, R, U
E3	G1, J, P, U
E4	G2, O, S, T, Y
F1	F2, J, L, X
F2	I, J, L, X
G1	H, J, P, Q, U
G2	O, S, T, Y
H	J, P, Q, U
I	L, V, X
J	L, P, Q, U
L	V, X
O	R, S, T, Y
P	Q, U
Q	U
R	S, T, Y
S	T, Y
T	Y

As porcentagens de talhões sem diferença estatística entre suas médias e semelhantes, de acordo com o agrupamento dos dados biofísicos, calculados a partir dos índices de vegetação NDVI, SAVI, GVI e RVI da imagem TM/LANDSAT, apresentaram valores maiores que os encontrados por RAMIREZ (2002) quando foram avaliadas as bandas 3, 4 e 5 do satélite ETM+/LANDSAT, em áreas cafeeiras do município de Pedregulho (SP), onde as porcentagens foram de, respectivamente, 19,5%, 17% e 12,2%.

Ao contrário do que ocorreu com a imagem TM/LANDSAT, o teste de Tukey não encontrou tantos pares de talhões sem diferença estatística entre suas médias, utilizando a imagem do QUICKBIRD. O que equivale dizer que, para a imagem do QUICKBIRD, a maioria dos pares de talhões foi considerada “diferente”, possuindo diferença estatística significativa ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados dos pares de talhões sem diferença estatística significativa, ao nível de 5% de probabilidade, para o índice NDVI calculado a partir da imagem QUICKBIRD. Ao todo, o teste detectou 14 pares de talhões (3,2% das 435 combinações de pares possíveis) sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, sendo que somente um possuía características semelhantes de acordo com o agrupamento realizado, o que equivale a 1,8% de concordância.

Tabela 21: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação NDVI do satélite QUICKBIRD.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
3	A, B, X
6	G1
A	B, X
B	X
D	Q
E2	P, U
E3	L
F1	H
G1	Y
G2	S, T

Os resultados encontrados para o índice RVI da imagem QUICKBIRD (Tabela 22) foi semelhante ao encontrado no NDVI, pois somente um par de talhões que não tinha

diferença estatística entre suas médias era semelhante também em campo, o que equivale a 1,8% de concordância. A diferença no resultado encontrado é que a quantidade total de pares de talhões sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, gerados pelo RVI, foi de oito (1,8% das 435 combinações de pares possíveis), quase a metade do valor encontrado no NDVI.

Tabela 22: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação RVI do satélite QUICKBIRD.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
3	A, B, X
A	B
E3	J, L
F1	H
U	Y

Na Tabela 23, são apresentados os pares de talhões sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, gerados pelo índice GVI do QUICKBIRD. Ressalta-se que nenhum dos 11 pares de talhões (2,5% das 435 combinações de pares possíveis) sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, era semelhante, de acordo com o agrupamento dos dados de campo.

Tabela 23: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação GVI do satélite QUICKBIRD.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
2	A, B, H
3	E3
A	B, H
B	H
E4	F2
G1	T
O	Y
U	Y

A Tabela 24 contém os pares de talhões sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, calculados pelo índice de vegetação SAVI do QUICKBIRD. Este teste

encontrou 13 pares de talhões (3,0% das 435 combinações de pares possíveis), sendo que três possuíam características semelhantes de acordo com o agrupamento realizado, o que equivale a 5,4% de concordância. Este resultado pode ser um indício da importância do efeito solo para a imagem do QUICKBIRD, que não é devidamente descontada nos outros três índices utilizados, como é no SAVI.

Tabela 24: Resultado da aplicação do teste de Tukey aos pares de talhões da imagem índice de vegetação SAVI do satélite QUICKBIRD.

Talhão	Talhões sem diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade
4	E3
6	E2, F1, F2, G1
AC	U
E2	F1, F2, G1
E3	J
F1	F2, G1
F2	G1
G1	X

Apesar dos resultados encontrados com os índices de vegetação NDVI, RVI e SAVI, gerados a partir da imagem QUICKBIRD, terem apresentado baixa concordância com o agrupamento realizado, os resultados foram superiores aos encontrados por RAMIREZ (2002) na avaliação de áreas com café utilizando a imagem pancromática do satélite IKONOS-II.

Um erro comum verificado nos pares de talhões sem diferença estatística ocorreu com os talhões X e V. Esse dois talhões só possuíam características iguais entre eles, pois eram os únicos talhões em formação na área e, portanto, não deveriam ser considerados sem diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, a talhões já formados. Nas análises com a imagem LANDSAT, este erro foi verificado 30 vezes para o talhão V e 39 vezes para o talhão X, sendo que os índices NDVI e SAVI foram os que cometeram este erro em um número menor de vezes. Já na análise da imagem QUICKBIRD, o erro não ocorreu nenhuma vez para o talhão V e cinco vezes para o talhão X, sendo que o número maior de vezes foi registrado na utilização do NDVI. De maneira geral o teste de Tukey, tanto para a imagem LANDSAT como para a imagem QUICKBIRD, não se mostrou eficiente para detectar talhões com características semelhantes em campo.

Ressalta-se que, no caso do TM/LANDSAT, para três índices de vegetação (o NDVI, o SAVI e o RVI), o número de pares de talhões identificados como não tendo diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade foram muito próximos, correspondendo, respectivamente, a 22,5%, 21,2% e 24,8% das 435 combinações possíveis de pares de talhões. O índice GVI foi o que apresentou comportamento distinto dos demais, com 83,0% das combinações possíveis sendo identificadas como não tendo diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade. No caso do QUICKBIRD, o desempenho dos índices de vegetação foi muito semelhante, com valores de 3,2%, 3,0%, 2,53% e 1,8% das 435 combinações possíveis de pares de talhões sendo identificadas como não tendo diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade. Ou seja, desconsiderando-se o índice GVI, os outros três índices de vegetação calculados a partir de imagens do TM/LANDSAT tiveram de 7 (NDVI e SAVI) a 13,5 (RVI) vezes mais pares de talhões identificados como não tendo diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, que o definido a partir da utilização de imagens do QUICKBIRD.

Embora o agrupamento dos dados biofísicos, descrito na Tabela 14, seja uma prática usual e tenha sido feito com base em critérios técnicos, visando aplicações como o cadastramento de propriedades agrícolas, a eficiência da identificação de talhões com características semelhantes, através da utilização dos índices de vegetação, não foi elevada para os dois satélites considerados. Ressalva feita ao índice GVI do TM/LANDSAT que, entretanto, encontrou um valor muito elevado de pares de talhões semelhantes.

4.3. Resultado da Análise Fatorial por Componentes Principais

4.3.1. Cálculo dos fatores para o satélite QUICKBIRD

A Tabela 25 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson, calculados a partir dos valores de refletância real das bandas espectrais do satélite QUICKBIRD, para os trinta talhões utilizados no trabalho. É possível verificar que as bandas do satélite QUICKBIRD, para os 30 talhões conjuntamente, são correlacionadas, o que justifica a realização da análise fatorial. As bandas B1, B2 e B3 são fortemente correlacionadas, enquanto que as

correlações entre B4 e as demais bandas são menores. Além disso, B4 e B2 não são correlacionadas (P-Valor = 0,197)

Tabela 25: Coeficientes de Correlação de Pearson (P-Valor)

	B1	B2	B3
B2	0,906 (0,000)		
B3	0,907 (0,00)	0,898 (0,00)	
B4	- 0,145 (0,00)	-0,014 (0,197)	-0,303 (0,00)

Dessa forma, através da técnica de análise fatorial, utilizando o método de componentes principais com rotação ortogonal varimax para a estimação dos fatores, foram obtidos dois fatores, denominados FATOR 1 e FATOR 2, de acordo com os seguintes critérios: número de fatores igual ao número de autovalores maiores ou iguais a um, interpretabilidade dos fatores e o princípio da parcimônia. Pelo gráfico mostrado na Figura 17, há dois autovalores maiores que 1, o que sugere a utilização de dois fatores, considerando os critérios citados acima.

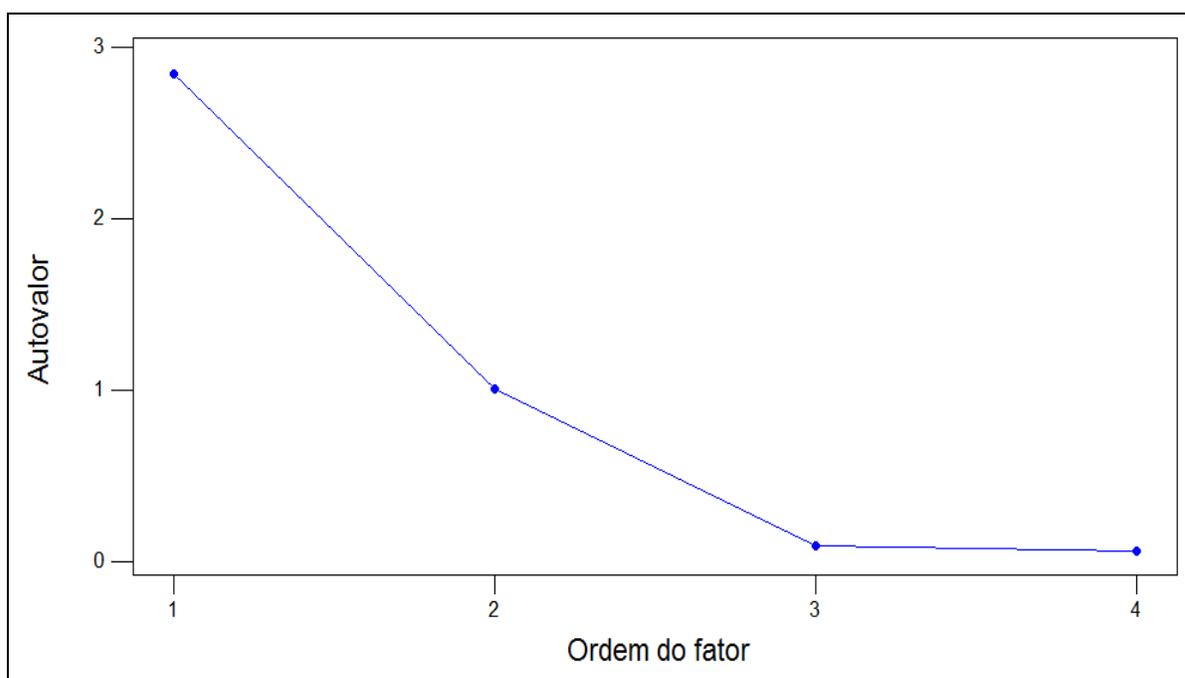


Figura 17: Gráfico com os autovalores e a ordem dos fatores.

Esses fatores foram construídos de tal forma a explicar 96,3% da variabilidade original dos dados, sendo 69,8% da variabilidade explicada pelo FATOR 1 e 26,5%, pelo FATOR 2. Na Tabela 26, são apresentadas as correlações de cada banda com os fatores estabelecidos. A Tabela 26 apresenta ainda a variabilidade da banda explicada pelos dois fatores incluídos no modelo fatorial, denominada de comunalidade.

Tabela 26: Correlação entre as bandas do satélite QUICKBIRD e os fatores obtidos pela análise fatorial, com destaque para as maiores correlações.

Bandas	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
B1	0,966	-0,076	0,940
B2	0,976	0,065	0,957
B3	0,948	-0,244	0,959
B4	0,072	0,996	0,997

De acordo com a Tabela 26, o primeiro fator é altamente correlacionado com as bandas B1, B2 e B3, enquanto que o segundo fator é altamente correlacionado com a banda B4. Para os dois fatores, as correlações com as suas respectivas bandas são positivas, havendo uma relação diretamente proporcional entre os fatores e suas respectivas bandas. Além disso, em todos os fatores, há presença de correlação com as bandas não citadas, porém sua magnitude é sempre menor do que aquela correlação com seu respectivo fator. A Figura 18 auxilia a visualizar a solução encontrada, sendo possível identificar os dois grupos distintos compostos pelas bandas, concluindo-se que a melhor escolha são dois fatores.

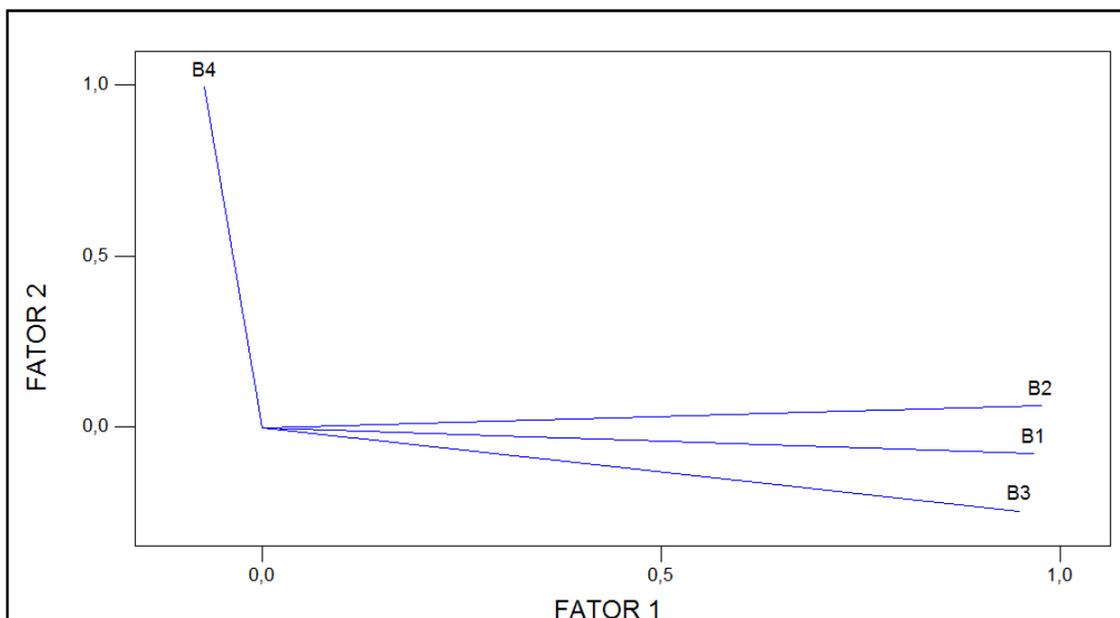


Figura 18: Gráfico de dispersão dos fatores

Depois de identificado e interpretado os fatores relacionados com as bandas, foram calculados os escores (valores numéricos) para cada elemento amostral, de modo a utilizar esses valores para a análise de agrupamento. Com o intuito de manter a escala de medida original das bandas, dadas em %, e, conseqüentemente, facilitar a interpretação, foi realizada uma transformação nos escores de tal forma que também ficassem no intervalo 0-100. Assim, a Tabela 27 apresenta as estatísticas descritivas para os escores dos fatores.

Tabela 27: Estatísticas descritivas para os escores dos fatores (%).

Fatores	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
FATOR 1	23,671	1,000	21,456	23,540	30,812
FATOR 2	23,301	1,000	20,115	23,713	26,488

4.3.1.1. Análise de Agrupamento para os dados do satélite QUICKBIRD

A Tabela 28 mostra as similaridades em cada passo do processo de agrupamento. À medida que avança o processo de agrupamento, a similaridade entre os conglomerados que estão sendo combinados, nos respectivos passos, vai decrescendo. Conseqüentemente, a distância entre eles vai aumentando. Assim, quando identificado um ponto de salto nas

distâncias (ou similaridade), há um indício do número natural de grupos que a amostra deve ser repartida.

Tabela 28: Histórico de agrupamento–similaridades, em destaque para etapa de mudança.

Etapa	nºgrupos	similaridade	distância	Etapa	nºgrupos	similaridade	distância
1	29	98,72	0,066	14	16	93,84	0,318
2	28	97,15	0,147	15	15	93,54	0,334
3	27	97,06	0,152	16	14	93,06	0,359
4	26	96,41	0,185	17	13	93,75	0,323
5	25	96,32	0,190	18	12	90,93	0,469
6	24	95,78	0,218	19	11	90,92	0,469
7	23	95,69	0,223	20	10	90,59	0,486
8	22	95,44	0,236	21	9	88,76	0,581
9	21	95,42	0,237	22	8	87,84	0,628
10	20	95,12	0,252	23	7	87,60	0,641
11	19	94,56	0,281	24	6	87,28	0,657
12	18	94,65	0,277	25	5	81,98	0,931
13	17	94,43	0,288	26	4	84,52	0,800

A maior diferença entre as distâncias (ou similaridade) ocorreu entre os passos 24 e 25, indicando um número de seis grupos finais, que foram os seguintes:

Grupo 1: Talhões 3, 4, L, E1, 2, E3, A, J, 6, G1, O, T, P, Q, S, R, U, B, D, H, F1, E4, F2;

Grupo 2: Talhão AC;

Grupo 3: Talhão Y, E2, G2

Grupo 4: Talhão I;

Grupo 5: Talhão V;

Grupo 6: Talhão X.

A Figura 19 apresenta o resultado obtido com a análise de agrupamento, através de um gráfico de dispersão (scatterplot), do FATOR 1 vs FATOR 2.

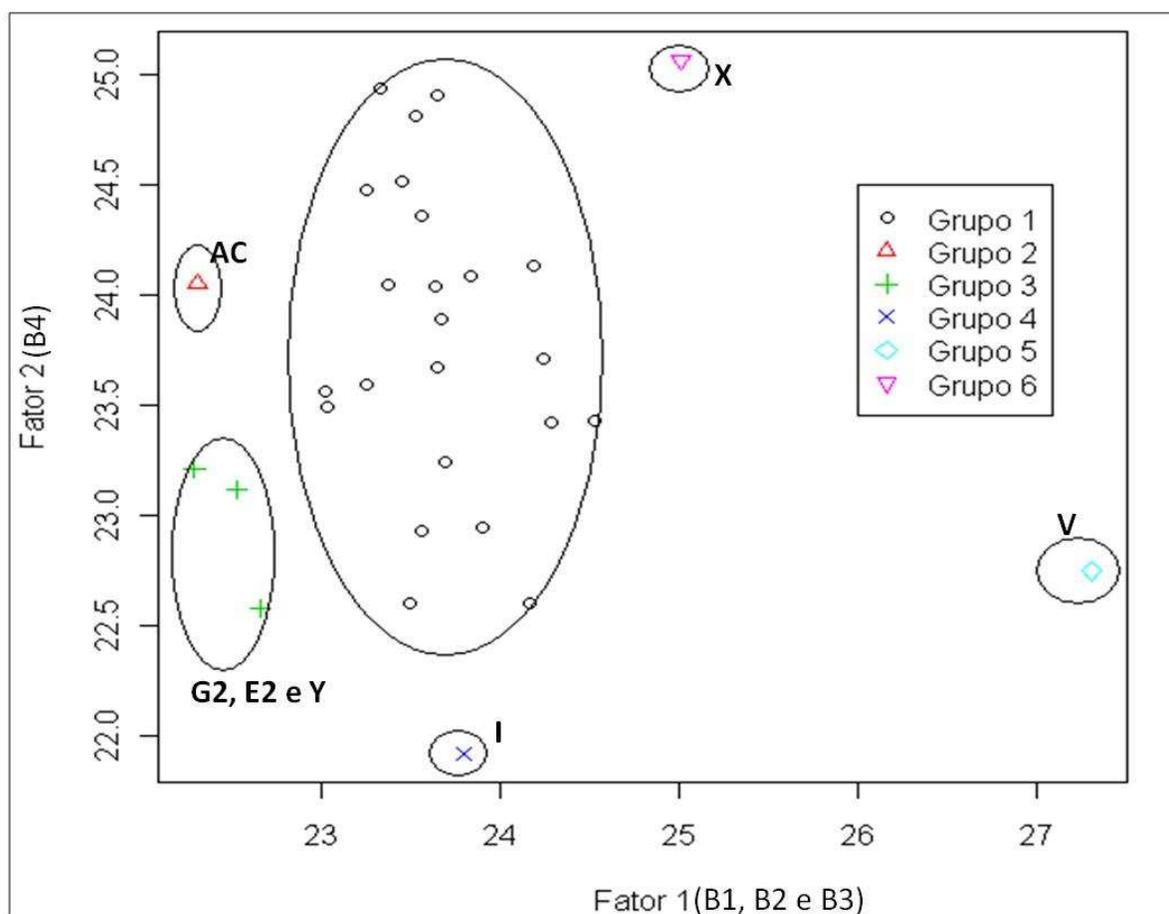


Figura 19: Gráfico apresentando FATOR 1 vs FATOR 2 com o resultado dos agrupamentos.

Ressalta-se aqui que o FATOR 1 é influenciado pelas bandas B1, B2 e B3. Logo valores elevados nessas bandas indicam valores elevados no FATOR 1. O FATOR 2 é influenciado pela banda B4, fazendo com que valores elevados nessa banda indiquem valores elevados no FATOR 2. A maioria dos talhões encontra-se no mesmo grupo, Grupo 1. Esse grupo possui uma variação elevada de valores no FATOR 2, mas uma variação pequena no FATOR 1, mostrando que a influência do solo e ou do sombreamento (mais evidenciados na banda do visível) foram os parâmetros que apresentaram maior contribuição para formação deste grupo.

O Grupo 2, formado pelo talhão AC, possui valores elevados para o FATOR 2 e valores muito baixos para o FATOR 1, caracterizando, de maneira precisa, seus parâmetros biofísicos levantados em campo, pois este talhão é o que possui a maior porcentagem de

cobertura do solo pelas plantas de café, além de estar no sistema superadensado, com mais de 7000 plantas/ha.

O Grupo 3, formado pelos talhões Y, E2 e G2, possuem valores abaixo da média para o FATOR 2 e valores muito baixos para o FATOR 1. De acordo com os parâmetros biofísicos destes talhões, somente a altura pode ser considerada “igual” (maior diferença é de 50cm, entre o talhão Y e G2) e nenhuma outra associação entre os parâmetros é observada. Uma observação pertinente com relação a esses talhões é que parte da área dos três é margeada por vegetação natural, o que pode, porventura, influenciar a umidade dos mesmos sendo que, visualmente, esses talhões possuem, também, coloração bastante semelhante, conforme pode ser constatado nas Figuras 13 e 14.

O talhão I foi classificado isoladamente no Grupo 4, possuindo valores baixos no FATOR 1 e no FATOR 2. A partir dos parâmetros mensurados em campo não é possível compreender tais resultados para o talhão I. Mas a partir das observações anotadas em campo, é possível inferir que este talhão era o menos “sadio”, com baixo vigor vegetativo (possivelmente, devido ao ataque de pragas ou doenças) e bastante desuniforme.

Ao contrário do que aconteceu na análise do teste de Tukey, os talhões em formação, X e V, não foram confundidos com os plantios em produção. É importante salientar, observando o scatterplot (Figura 18), que o talhão X possui valores elevados para o FATOR 2, o qual é fortemente influenciado pela banda B4. Esse fato ocorreu, pois apesar da baixa porcentagem de cobertura do solo pelas plantas de café neste talhão, ele possuía matéria verde nas entrelinhas (constatação de campo). Já o talhão V, Grupo 5, ficou bem caracterizado no scatterplot, mostrando valores baixos para o FATOR 2 e valores elevados no FATOR 1, resposta típica de talhões em formação, devido à quantidade de solo exposto.

A Figura 20 apresenta o *dendograma* (árvore) do processo de agrupamento, onde os quadrados em vermelho correspondem aos seis grupos com maiores similaridades internas, discutidos acima, ficando claro o grau de relacionamento entre os talhões. Cabe salientar, também, que o Grupo 1 pode ainda ser subdividido em três novos sub-grupos, de acordo com o interesse do estudo a ser realizado. Neste caso, as análises de agrupamento foram definidas de acordo com a metodologia já descrita.

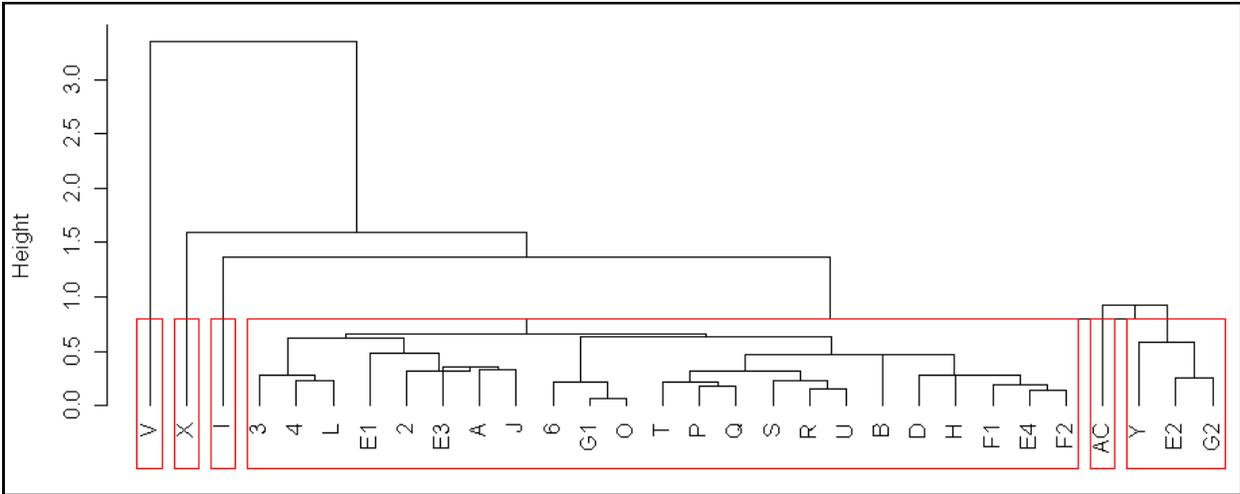


Figura 20: Dendrograma (árvore) de agrupamento dos dados do satélite QUICKBIRD.

4.3.2. Cálculo dos fatores para o satélite TM/LANDSAT

Na Tabela 29, encontram-se os coeficientes de correlação de Pearson, calculados a partir dos valores da refletância real das bandas espectrais do satélite TM/LANDSAT para os trinta talhões utilizados no trabalho. É possível verificar que as bandas do satélite LANDSAT, para os 30 talhões conjuntamente, são correlacionadas, o que justifica a análise fatorial. As bandas TM1, TM2, TM3, TM5 e TM7 são fortemente correlacionadas, enquanto que as correlações entre TM4 e as demais bandas são as menores.

Tabela 29: Coeficientes de Correlação de Pearson (P-Valor).

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5
TM2	0,639 (0,00)				
TM3	0,869 (0,00)	0,686 (0,00)			
TM4	-0,125 (0,00)	-0,132 (0,00)	-0,258 (0,00)		
TM5	0,845 (0,00)	0,681 (0,00)	0,889 (0,00)	-0,134 (0,00)	
TM7	0,671 (0,00)	0,547 (0,00)	0,767 (0,00)	-0,285 (0,00)	0,777 (0,00)

Dessa forma, através da técnica de análise fatorial, utilizando o método de componentes principais com rotação ortogonal varimax para a estimação dos fatores,

foram obtidos dois fatores denominados FATOR 1 e FATOR 2, de acordo com os seguintes critérios: número de fatores igual ao número de autovalores maiores ou iguais a um, interpretabilidade dos fatores e o princípio da parcimônia. Pelo scree-plot, mostrado na Figura 21, há dois autovalores maiores que 1, o que sugere a utilização de dois fatores, considerando os critérios citados acima. Os fatores foram construídos de modo a explicar 83,4% da variabilidade original dos dados, sendo 67,1% da variabilidade explicada pelo FATOR 1 e 16,3%, pelo FATOR 2.

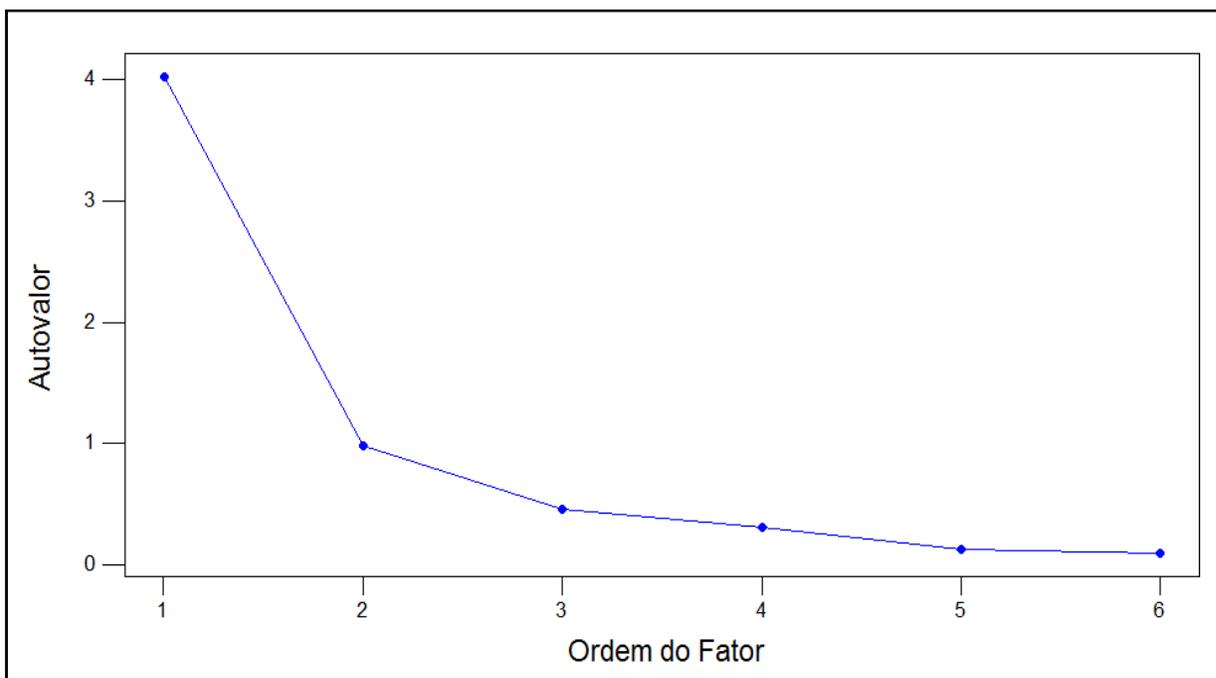


Figura 21: Gráfico com os autovalores e a ordem dos fatores.

Na Tabela 30, são apresentadas as correlações de cada banda com os fatores estabelecidos e a variabilidade da banda explicada pelos dois fatores incluídos no modelo fatorial, denominada comunalidade.

Tabela 30: Correlação entre as bandas do satélite TM/LANDSAT e os fatores obtidos pela análise fatorial, com destaque para as maiores correlações.

Bandas	Fator 1	Fator 2	Comunalidade
TM1	0,915	0,022	0,837
TM2	0,795	0,021	0,632
TM3	0,937	0,178	0,909
TM4	-0,091	-0,988	0,984
TM5	0,948	0,047	0,901
TM7	0,814	0,274	0,738

O primeiro fator é altamente correlacionado com as bandas TM1, TM3 e TM5, enquanto que o segundo fator é altamente correlacionado com a banda TM4. Para o FATOR 1, as correlações com as respectivas bandas são positivas, enquanto que para o FATOR 2, a correlação é negativa. Assim, há uma relação diretamente proporcional entre o FATOR 1 e suas bandas, mas uma relação inversamente proporcional entre o FATOR 2 e a banda TM4. Além disso, em todos os fatores há presença de correlação com as bandas não citadas, porém sua magnitude é sempre menor do que aquela correlação com seu respectivo fator.

Na Figura 22 é possível visualizar os dois fatores compostos pelas bandas. Desse modo, conclui-se que a melhor escolha são dois fatores.

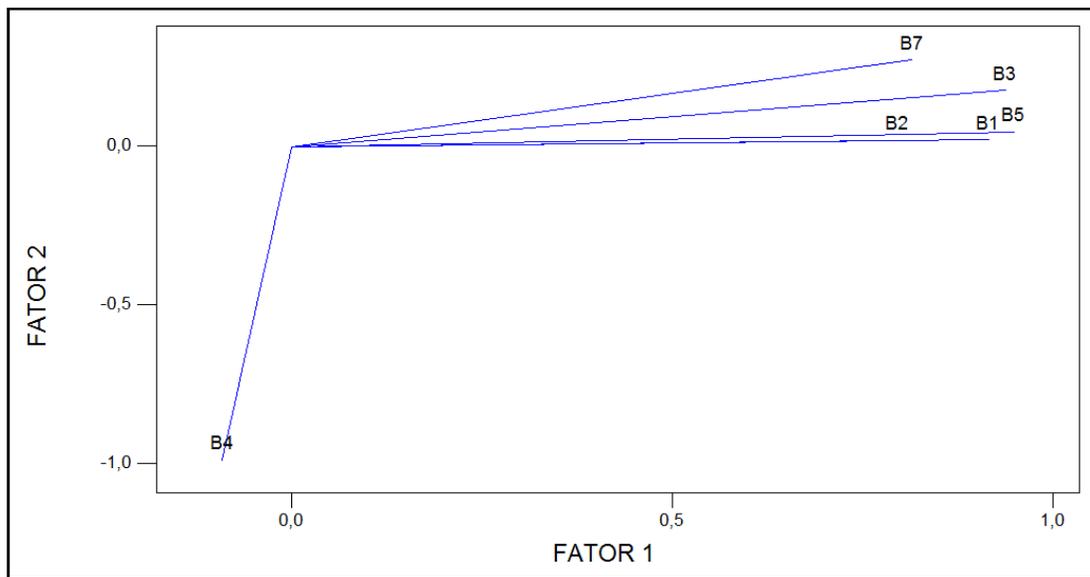


Figura 22: Gráfico de dispersão dos fatores

Como para a imagem do satélite QUICKBIRD, foram calculados os escores (valores numéricos) para cada elemento amostral, de modo a utilizar esses valores para a análise de agrupamento. Para manter a escala de medida original das bandas, dadas em %, e conseqüentemente, facilitar a interpretação, foi realizada uma transformação nos escores de tal forma que também ficassem no intervalo 0-100. Assim, na Tabela 30, são mostradas as estatísticas descritivas para os escores dos fatores.

Tabela 31: Estatísticas descritivas para os escores dos fatores (%), para a imagem TM/LANDSAT.

Fatores	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
FATOR 1	41,800	1,000	39,372	41,722	45,180
FATOR 2	53,483	1,000	50,838	53,561	55,784

4.3.2.1. Análise de Agrupamento para os dados do satélite TM/LANDSAT

A Tabela 31 mostra as similaridades em cada passo do processo de agrupamento. À medida que se avança no processo de agrupamento, a similaridade entre os conglomerados que estão sendo combinados, nos respectivos passos, vai decrescendo e a distância entre eles vai aumentando. Assim, quando identificado um ponto de salto nas distâncias (ou similaridade), há um indício do número natural de grupos que a amostra deve ser repartida.

Tabela 32: Histórico de agrupamento–similaridades, em destaque a etapa de mudança.

Etapa	nºgrupos	similaridade	distância	Etapa	nºgrupos	similaridade	distância
1	29	99,04	0,035	15	15	87,39	0,467
2	28	97,58	0,090	16	14	87,09	0,478
3	27	97,25	0,102	17	13	86,94	0,484
4	26	96,03	0,147	18	12	85,79	0,526
5	25	94,61	0,199	19	11	85,95	0,520
6	24	94,11	0,218	20	10	84,16	0,586
7	23	93,60	0,237	21	9	81,77	0,675
8	22	93,55	0,239	22	8	81,25	0,694
9	21	92,10	0,293	23	7	82,36	0,653
10	20	91,55	0,313	24	6	80,91	0,707
11	19	91,24	0,324	25	5	80,67	0,716
12	18	91,14	0,328	26	4	78,49	0,797
13	17	90,50	0,352	27	3	70,65	1,087
14	16	88,29	0,434	28	2	63,81	1,340

A maior diferença entre as similaridades (ou distâncias) ocorre entre os passos 26 e 27, indicando um número de quatro grupos finais. A Figura 23 apresenta o *dendograma* (árvore) do processo de agrupamento da imagem LANDSAT.

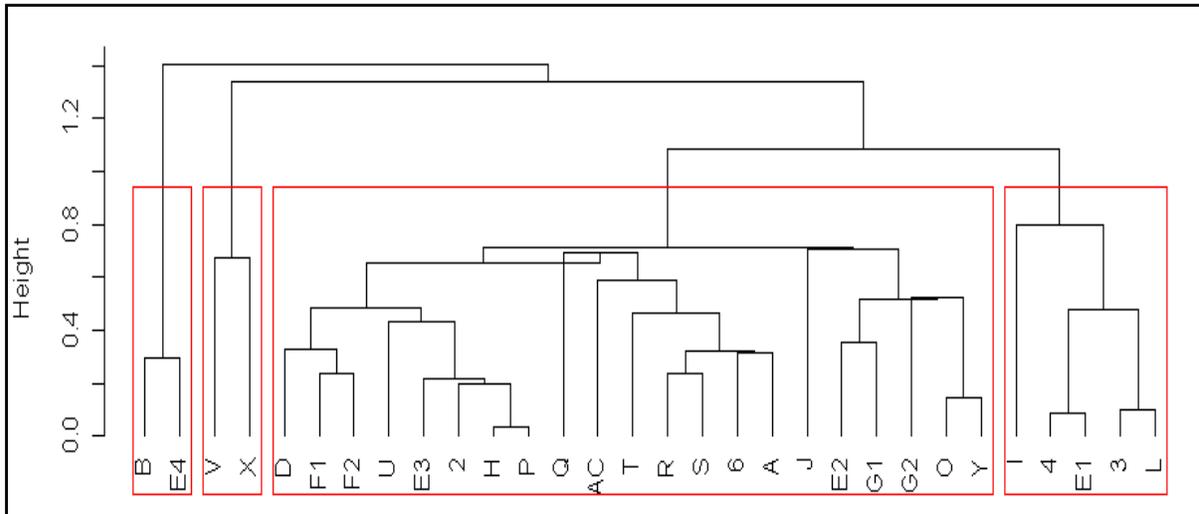


Figura 23: Dendograma do agrupamento do satélite TM/LANDSAT

Os quadrados em vermelho, no gráfico acima, determinam os quatro grupos com maiores similaridades internas, sendo identificados por:

Grupo 1: Talhões D, F1, F2, U, E3, 2, H, P, Q, AC, T, R, S, 6, A, J, E2, G1, G2, O e Y

Grupo 2: Talhões I, 4, E1, 3 e L

Grupo 3: Talhões B e E4;

Grupo 4: Talhões V e X.

Na Figura 24, é representado o scatterplot do FATOR 1 vs FATOR 2 com os agrupamentos dos 30 talhões para a imagem do TM/LANDSAT.

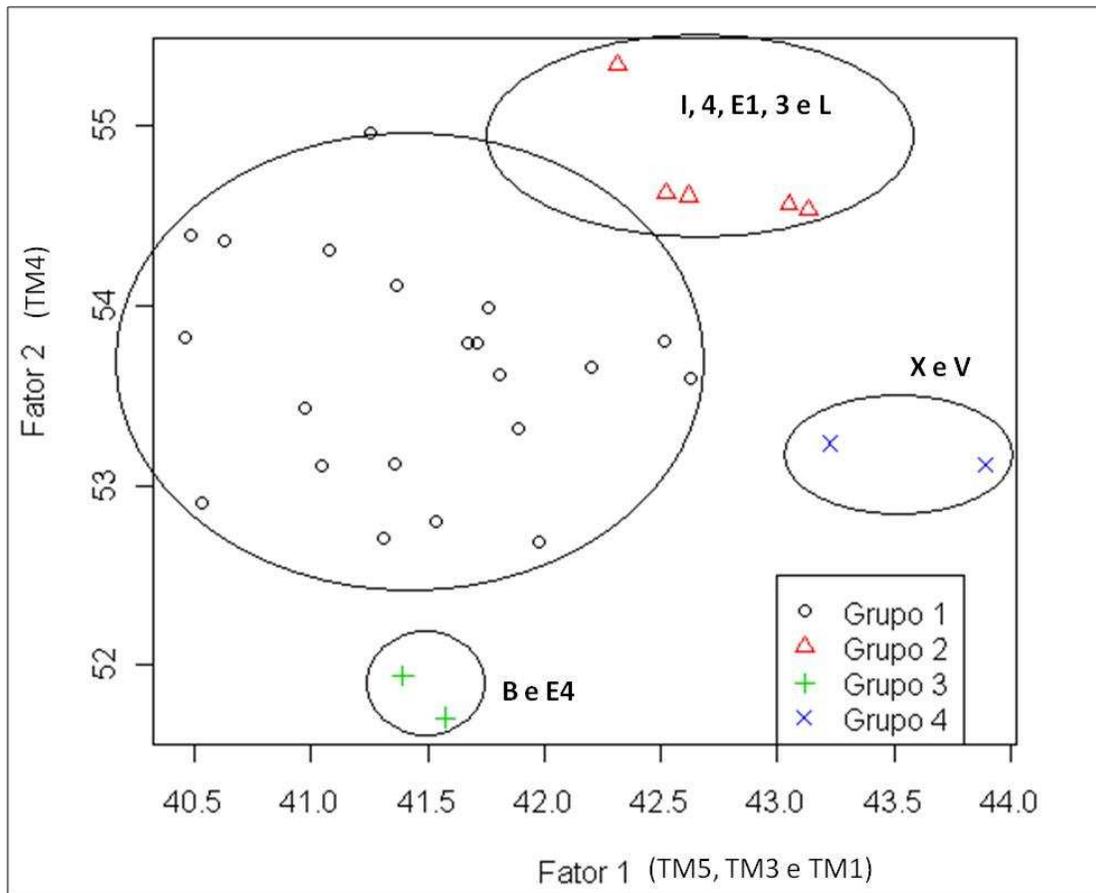


Figura 24: Gráfico apresentando FATOR 1 vs FATOR 2 com o resultado dos agrupamentos

Ressalta-se que há uma relação diretamente proporcional entre o FATOR 1 e as bandas TM5, TM3 e TM1, respectivamente, fazendo com que valores elevados nessas bandas indiquem valores elevados no FATOR 1. Há, entretanto, uma relação inversamente proporcional entre o FATOR 2 e a banda TM4, fazendo com que valores elevados nessa banda correspondam a valores baixos no FATOR 2.

O Grupo 1 é formado pela maioria dos talhões levantados em campo, possuindo uma dispersão maior no FATOR 1 e menor no FATOR 2, mostrando que os valores do FATOR 2 (altamente relacionado pela banda TM4) foram os que mais influenciaram na formação desse grupo. Valores elevados no FATOR 2 e valores medianos no FATOR 1 caracterizam a resposta do Grupo 2, que é formado por talhões com porcentagem de cobertura do solo pelas plantas de café (%COB) em torno de 63% e pelo cultivo tradicional, menor densidade de plantas por área, o que contribuiu para sua resposta.

Um dos fatores que podem ter contribuído para a formação do Grupo 3 é a associação de dois parâmetros biofísicos, a %COB e a densidade populacional. Apesar do talhão B possuir %COB menor em relação ao talhão E4 (55% e 68%, respectivamente), a densidade populacional do talhão B é 1,75 vezes maior que a do talhão E4. É provável que a combinação entre a %COB e a densidade populacional seja a melhor associação entre os parâmetros biofísicos para a interpretação da resposta espectral de cafezais.

Como aconteceu para o satélite QUICKBIRD, também não houve confusão entre os talhões em formação (talhões V e X) com os demais talhões em produção. A diferença entre o resultado dos dois satélites é que o agrupamento dos dados do LANDSAT gerou um único grupo para os talhões em formação, enquanto que, com a imagem QUICKBIRD, esses talhões formaram grupos distintos. Esse resultado vem a confirmar a maior influência do plano de fundo para a imagem do satélite QUICKBIRD.

4.4. Resultado das Análises de Regressão

Os preditores (variáveis independentes que estão relacionadas às bandas e índices de vegetação das imagens dos satélites) gerados a partir da análise *stepwise* foram utilizados na tentativa de explicar as respostas dos parâmetros biofísicos através de equações geradas por regressão múltipla. Foram consideradas as equações com valores de R^2 superiores a 60%, conforme resultados apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: Equações de regressão múltipla e seus respectivos R^2 (para $\alpha=5\%$)

Equação	R^2
Bio = 1,68 – 19,8 Q1 – 0,148 QGVI + 1,72 Q4 – 17,7 L1 + 2,61 L7	85,7%
IAF = 17,5 - 113 Q1 – 3,16 QGVI – 6,44 Q3 + 18,7 QSAV - 653 L1 + 71,2 L5	75,7%
Altura = 6,17 – 85,6 Q1 – 0,875 QGVI + 13,2 Q4 - 156 L1 + 36,2 L3	70,0%
%COB = 2,63 – 19,5 Q2 – 0,621 Q3 – 1,10 QNDV	63,7%

Legenda: Bio (biomassa), IAF (índice de área foliar), %COB (porcentagem de cobertura do terreno pelas plantas de café), Q1 (banda do azul do QUICKBIRD), QGVI (índice de vegetação do verde para o QUICKBIRD), Q4 (banda do infravermelho próximo do QUICKBIRD), L1 (banda do azul do TM/LANDSAT), L7 (banda do infravermelho médio do TM/LANDSAT), Q3 (banda do vermelho do QUICKBIRD), QSAV (índice de vegetação ajustado ao solo do QUICKBIRD), L5 (banda do infravermelho médio do TM/LANDSAT), L3 (banda do vermelho do TM/LANDSAT), Q2 (banda do verde do QUICKBIRD), QNDV (índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI, do QUICKBIRD).

De acordo com as regressões múltiplas geradas a partir do programa Minitab, o parâmetro Biomassa foi o que obteve o maior R^2 , 85,7%, seguido pelo IAF, Altura e %COB. O IAF foi o parâmetro que precisou de um número maior de *preditores* (seis) para descrever seu comportamento.

O programa AJUSTE gerou equações e seus respectivos R^2 para cada parâmetro biofísico, bandas espectrais e índices de vegetação utilizados como entrada no programa. Foram consideradas regressões com valores de R maiores que 0,85 entre os parâmetros biofísicos (variável dependente) e as bandas e índices de vegetação gerados a partir dos dados dos dois satélites (variável independente). Para avaliar os resultados das análises de regressão, foram gerados gráficos de dispersão dos pontos mostrando a linha de ajuste. A equação obtida foi aplicada nos oito talhões testes, separados para este fim.

Na Tabela 34 são apresentadas as equações de ajuste e seus respectivos R^2 para os parâmetros calculados a partir da imagem TM/LANDSAT.

Tabela 34: Equações geradas pelo programa Ajuste e seus respectivos R^2 (para $\alpha=5\%$) para os parâmetros Biomassa, IAF e Altura.

Equação	R^2
$Bio=4,8353805*EXP(-217,077698*L1+(9403,76953)*(L1^2)+(-133093,516)*(L1^3))$	87,0%
$Bio=2,30608702*EXP(-66,0669556*L2+(1517,65869)*(L2^2)+(-11074,0859)*(L2^3))$	84,5%
$Bio=4,47563434*10^{-006}*(Q2^{-8,62882805+(-3,49179101)*LOG10(Q2)})$	85,5%
$Bio=0,557779312*EXP(83,6939774*Q1+(-3871,16577)*(Q1^2)+(45794,7969)*(Q1^3))$	84,2%
$IAF=2787810*EXP(-1745,95178*L1+(75613,3359)*(L1^2)+(-1068701,88)*(L1^3))$	84,0%
$IAF=2466621,5*EXP(-828,582214*L2+(17119,8262)*(L2^2)+(-115280,789)*(L2^3))$	80,0%
$IAF=1,24841582*10^{-38}*(Q2^{-62,3811951+(-25,1502056)*LOG(X)})$	76,0%
$IAF=0,186532617*EXP(542,184448*Q1+(-25258,4805)*(Q1^2)+(292005,594)*(Q1^3))$	76,0%
$Alt=17,4797192*EXP(-304,789185*L1+(14416,4854)*(L1^2)+(-220092,781)*(L1^3))$	74,5%
$Alt=0,000270756*EXP(-382,140381*Q2+(-5112,61768)*(Q2^2)+(20986,9004)*(Q2^3))$	72,4%

O parâmetro Biomassa mostrou-se o mais bem correlacionado com os dados dos satélites de acordo com as equações não-lineares utilizadas no programa AJUSTE. A Biomassa foi ajustada às bandas TM1 e TM2 do LANDSAT e B1 e B2 do QUICKBIRD. O ajuste do parâmetro Biomassa com a banda TM1 foi o que obteve o maior R^2 sendo que a equação que proporcionou o melhor ajuste foi a Exponencial Cúbica. Na Figura 24, apresentam-se os gráficos mostrando a dispersão dos dados da Biomassa e suas respectivas curvas de ajuste. Analisando-se estes gráficos e a Tabela 34, verifica-se que apesar do maior R^2 ter sido obtido com a banda TM1 do LANDSAT, a curva que aparenta descrever melhor a relação entre os dados de campo e os espectrais foi a obtida com a TM2 do LANDSAT.

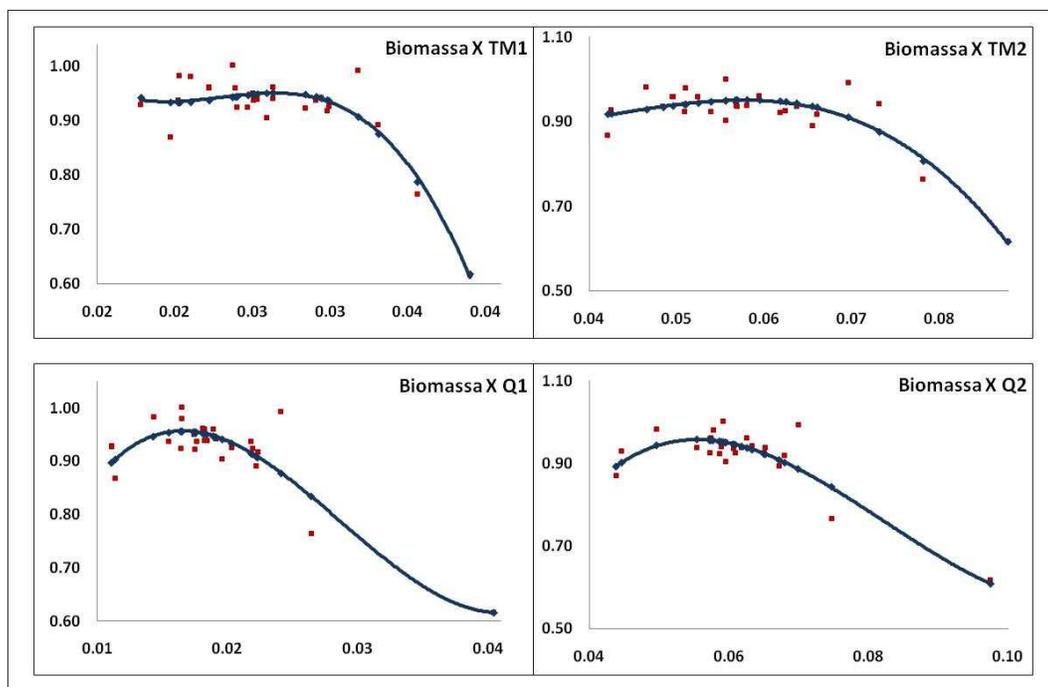


Figura 25: Gráficos mostrando a dispersão dos dados da biomassa e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 e 2 do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD.

O parâmetro IAF mostrou-se mais bem correlacionado com as bandas TM1 e TM2 do LANDSAT e com as bandas 2 e 1 do QUICKBIRD. A equação utilizada para o ajuste das bandas TM1 e TM2 e banda 1 do QUICKBIRD foi a exponencial cúbica e para a banda 1 do QUICKBIRD foi a equação alométrica curvilínea. Na Figura 26, são apresentadas a dispersão dos dados e a curva de melhor ajuste para eles. Analisando-se esta Figura, pode-se concluir que a melhor dispersão de pontos foi com a curva de gerada a partir da banda TM2 do satélite LANDSAT.

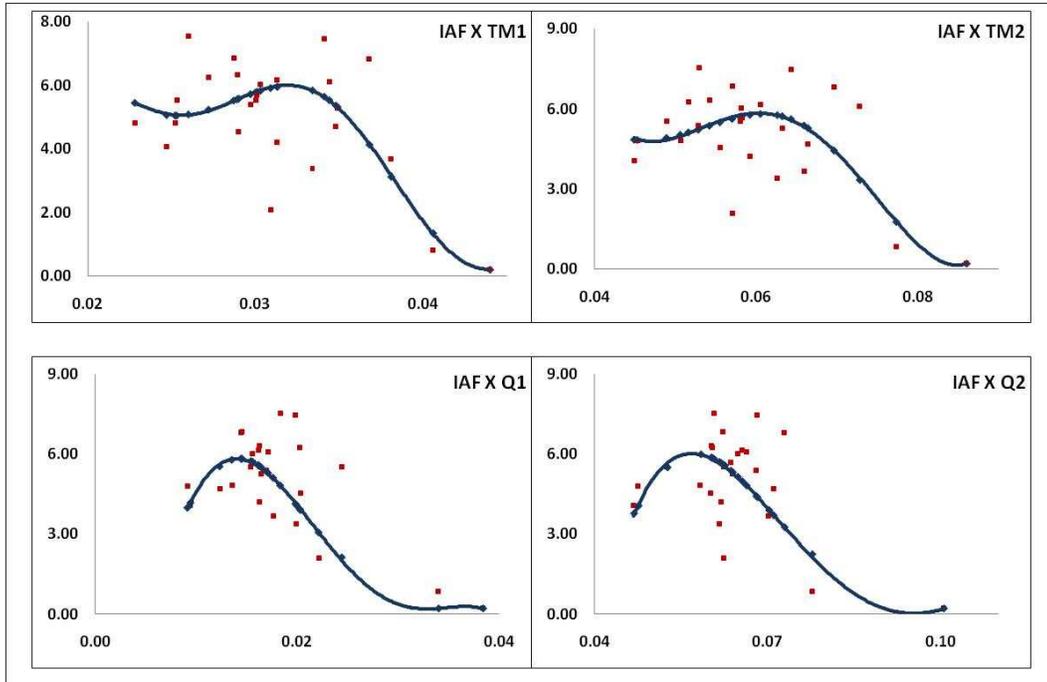


Figura 26: Gráficos mostrando a dispersão dos dados do IAF e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 e 2 do TM/LANDSAT e do QUICKBIRD.

O parâmetro Altura mostrou-se mais bem correlacionado com a banda TM1 do LANDSAT e a banda 2 do QUICKBIRD. Para os dois casos a equação que propiciou melhor ajuste foi a exponencial cúbica. Analisando os gráficos apresentados na Figura 27 e a Tabela 34, verifica-se que o maior R^2 foi obtido com a banda TM1 do LANDSAT e a melhor dispersão dos pontos no gráfico também ocorre nessa banda.

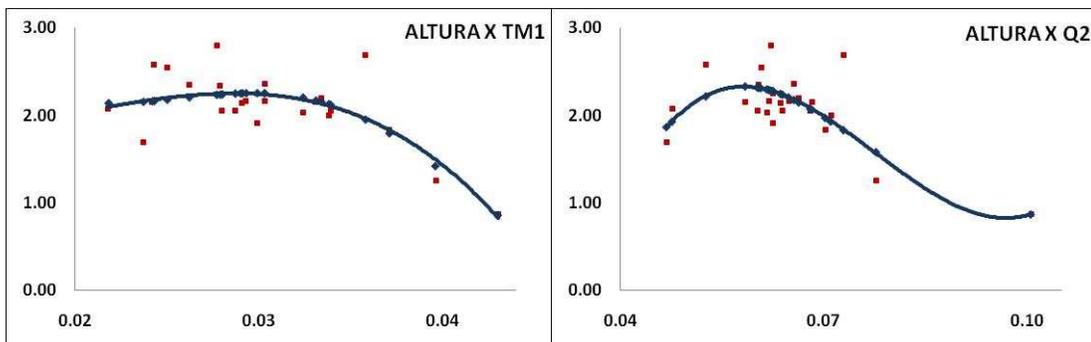


Figura 27: Gráficos mostrando a dispersão dos dados de altura e as curvas de ajuste desses pontos para as bandas 1 do LANDSAT e banda 2 do QUICKBIRD

É importante ressaltar que apesar do programa AJUSTE utilizar também a equação linear, em nenhum dos casos avaliados ela teve correlação alta, sendo que, na maioria dos casos, o R^2 ficou abaixo de 0,30. Isto vem corroborar a afirmação feita por ZULLO JR e ARRUDA (1989) que a relação existente entre dados experimentais na área agrícola normalmente não é linear.

4.4.1. Avaliação dos modelos gerados a partir das análises de regressão

4.4.1.1. Avaliação dos modelos gerados para o índice de área foliar (IAF)

Na Tabela 35, são apresentados os valores dos índices de área foliar (IAF) estimados, através dos dados de campo, e os calculados, a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda 1 do TM/LANDSAT.

Tabela 35: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM1 do LANDSAT.

Talhão	IAF EST	IAF CAL	Diferença	Erro relativo (%)
T1	4,156	5,272	-1,116	26,846
T2	2,654	5,291	-2,637	99,352
T3	5,424	5,749	-0,324	5,980
T4	5,081	5,046	0,036	0,700
T5	7,052	5,971	1,081	15,333
T6	4,633	5,931	-1,298	28,012
T7	4,073	5,563	-1,490	36,585
T8	4,712	5,860	-1,148	24,359

Verifica-se, neste caso, que o maior erro relativo foi encontrado no talhão-teste T2 (99,3%), que foi o talhão com o menor valor de IAF estimado. O talhão T7 também apresentou um erro relativo elevado (36,6%), sendo o segundo menor IAF estimado. O erro relativo médio para esta análise foi de 29,6%. A Figura 28 apresenta os valores da Tabela 35 na forma gráfica.

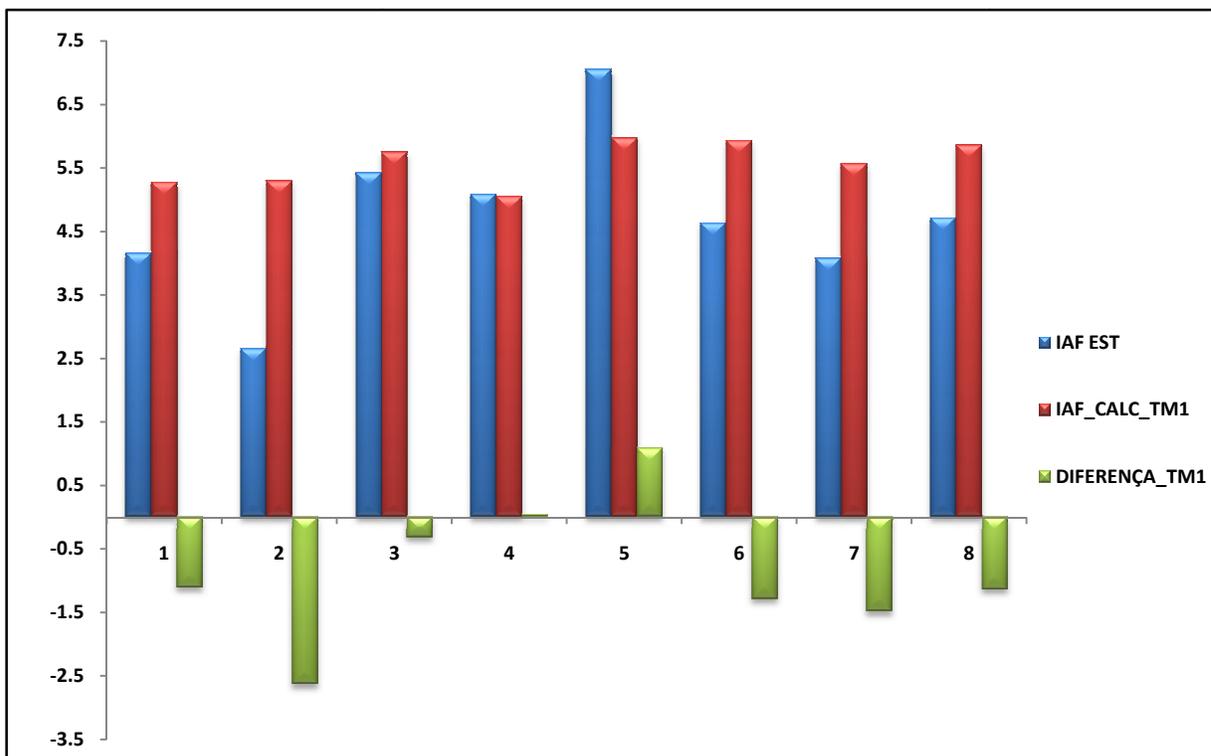


Figura 28: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença entre eles, para a banda 1 do TM/LANDSAT.

Os valores dos índices de área foliar (IAF) estimados, através dos dados de campo, e os calculados, a partir da equação de regressão obtida com os dados da banda TM2 do LANDSAT, são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM2 do LANDSAT

Talhão	IAF EST	IAF CALC	Diferença	Erro relativo (%)
T1	4,156	4,858	-0,702	16,883
T2	2,654	5,813	-3,159	119,036
T3	5,424	5,822	-0,398	7,341
T4	5,081	5,210	-0,129	2,531
T5	7,052	5,814	1,238	17,555
T6	4,633	5,692	-1,059	22,864
T7	4,073	4,871	-0,798	19,583
T8	4,712	5,738	-1,026	21,770

De acordo com os dados da Tabela 36, verifica-se que o maior erro relativo obtido foi apresentado pelo talhão T2 (119%), sendo que o segundo maior erro foi apresentado pelo talhão T6 (22,8%). O maior erro relativo foi apresentado pelo talhão que possuía o menor valor de IAF estimado, resultado igual ao apresentado na análise do IAF para a TM1. Na Figura 29, são apresentados graficamente os IAF estimados, calculados e as diferenças existentes entre eles, para a banda 2 do TM/LANDSAT. O erro relativo médio, neste caso, foi de 28,4%, menor que o apresentado utilizando a equação baseada na banda 1 do TM/LANDSAT. Na prática, o desempenho dos dois modelos foi muito semelhante, apesar das diferenças dos valores do R^2 e do erro relativo das estimativas feitas com os talhões-teste.

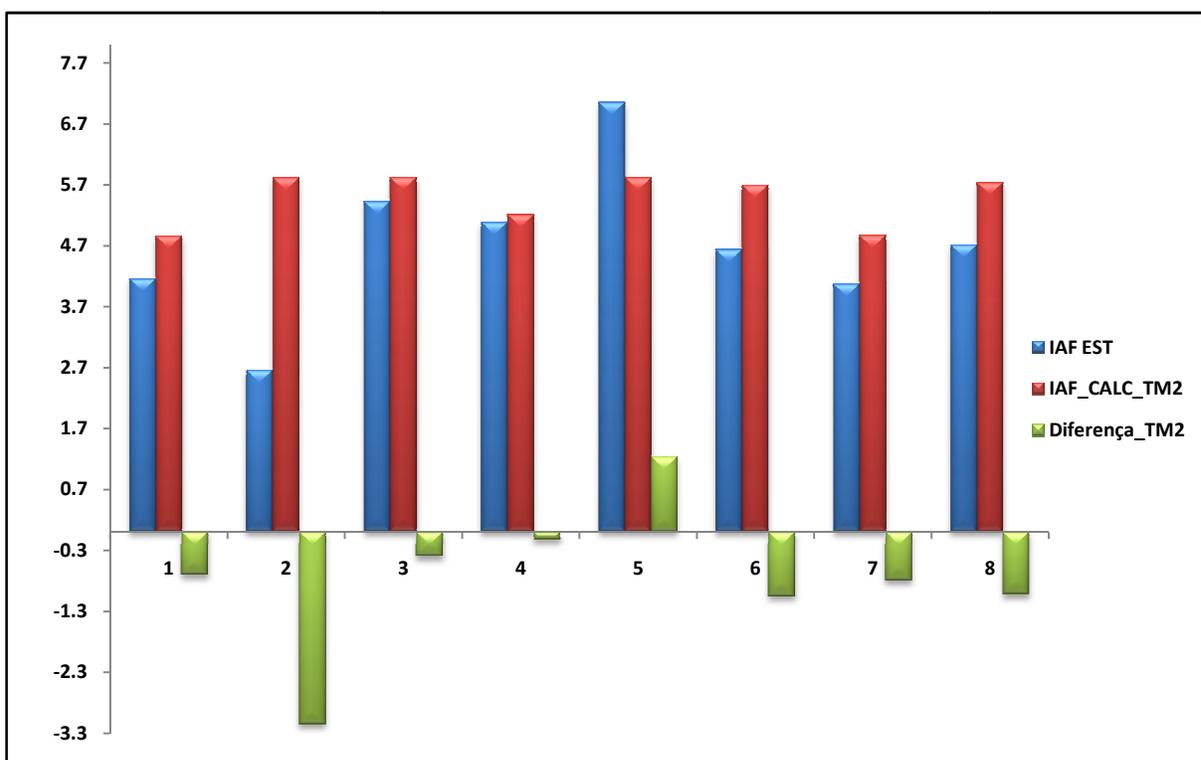


Figura 29: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do TM/LANDSAT.

Na Tabela 37, são apresentados os valores dos índices de área foliar (IAF) estimados, através dos dados de campo, e os calculados a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda 1 do satélite QUICKBIRD.

Tabela 37: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 1 do QUICKBIRD.

Talhão	IAF EST	IAF CALC	Diferença	Erro relativo (%)
T1	4,156	4,936	-0,780	18,757
T2	2,654	3,181	-0,527	19,868
T3	5,424	5,234	0,190	3,506
T4	5,081	4,950	0,131	2,583
T5	7,052	5,339	1,713	24,295
T6	4,633	3,941	0,692	14,939
T7	4,073	5,462	-1,389	34,096
T8	4,712	5,562	-0,850	18,036

Observa-se que o maior erro relativo foi obtido na estimativa do talhão-teste T7 (34,1%), sendo o segundo encontrado no talhão T5 (24,3%). O erro relativo médio para esta análise foi de 17%. Na Figura 30, os dados da Tabela 37 são representados graficamente.

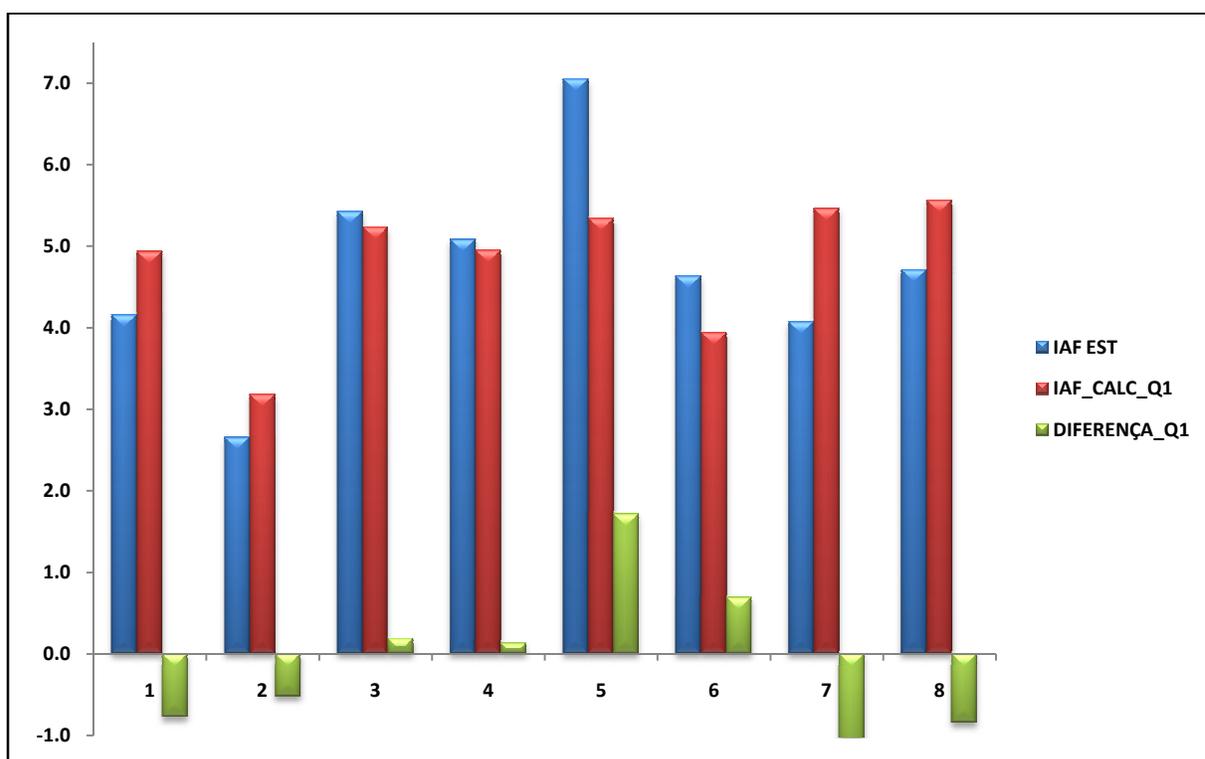


Figura 30: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 1 do QUICKBIRD.

Os valores do índice de área foliar (IAF) estimado, através dos dados de campo, e calculado, a partir da equação de regressão obtida com os dados da banda 2 do QUICKBIRD, são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38: Valores do IAF estimado (IAF EST) e calculado (IAF CALC) a partir da equação de regressão dos dados banda 2 do QUICKBIRD.

Talhão	IAF EST	IAF CALC	Diferença	Erro relativo (%)
T1	4,156	4,828	-0,672	16,169
T2	2,654	4,098	-1,444	54,393
T3	5,424	5,538	-0,114	2,101
T4	5,081	5,796	-0,714	14,057
T5	7,052	5,488	1,565	22,186
T6	4,633	5,112	-0,479	10,347
T7	4,073	5,745	-1,672	41,047
T8	4,712	5,193	-0,481	10,200

Na Tabela 38, verifica-se que o maior erro relativo foi encontrado no talhão-teste T2 (54,4%), sendo este talhão o que possuía o menor IAF estimado. O talhão T7 também apresentou um erro relativo elevado (41%), possuindo o segundo menor IAF estimado. O erro relativo médio para esta análise foi de 21,3%, valor maior do que o apresentado na análise baseada na banda 1 do QUICKBIRD. Na Figura 31, os dados apresentados na Tabela 35 são representados graficamente.

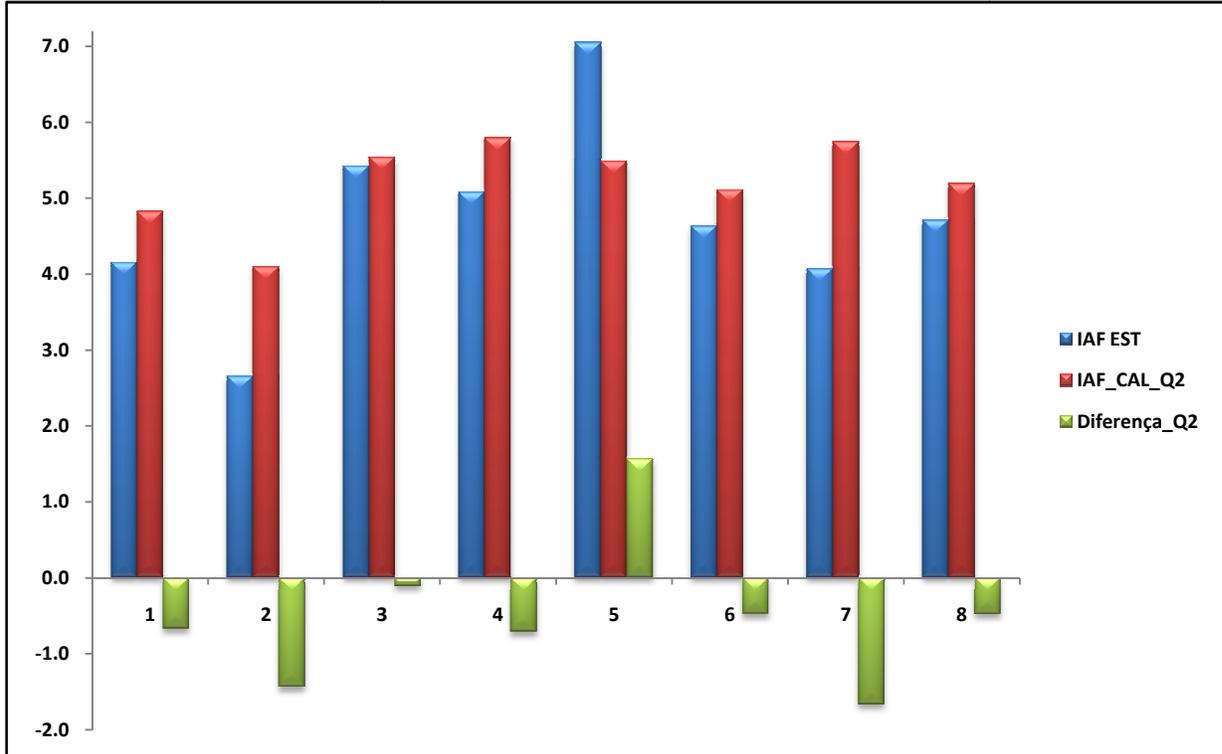


Figura 31: Gráfico com os valores do IAF estimado, calculado e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do QUICKBIRD.

Os modelos de regressão gerados para o parâmetro Índice de Área Foliar (IAF) apresentaram coeficientes de correlação elevados, sendo que a banda TM1 do LANDSAT foi a que apresentou o maior valor: 84%. De acordo com os erros relativos médios obtidos na estimativa do IAF dos talhões-teste, a banda 1 do satélite QUICKBIRD foi a que apresentou o menor valor: 17%.

4.4.1.2. Avaliação dos modelos gerados para a quantidade de biomassa.

Na Tabela 39, são apresentados os valores da Biomassa estimados através dos dados de campo, e os calculados a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda TM1 do LANDSAT.

Tabela 39: Valores do parâmetro Biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM1 do LANDSAT.

Talhão	BIO EST	BIO CAL	Diferença	Erro relativo(%)
T1	0,931	0,939	-0,008	0,807
T2	0,890	0,936	-0,046	5,188
T3	0,934	0,947	-0,012	1,331
T4	0,937	0,934	0,004	0,382
T5	0,939	0,952	-0,013	1,402
T6	0,950	0,951	-0,001	0,137
T7	0,904	0,944	-0,040	4,419
T8	0,916	0,949	-0,034	3,664

De acordo com os dados apresentados na Tabela 39, observa-se que o talhão T2 foi o que apresentou o maior erro relativo (5,2%), o talhão T7 o segundo e o talhão T8 o terceiro. Estes três talhões-teste foram os que possuíam os menores valores de biomassa. Todos os erros cometidos pelo modelo tenderam a superestimar os valores de biomassa. Na Figura 32, são apresentados os valores estimados de biomassa, para cada talhão, os valores calculados a partir do modelo de regressão e as diferenças existentes entre eles.

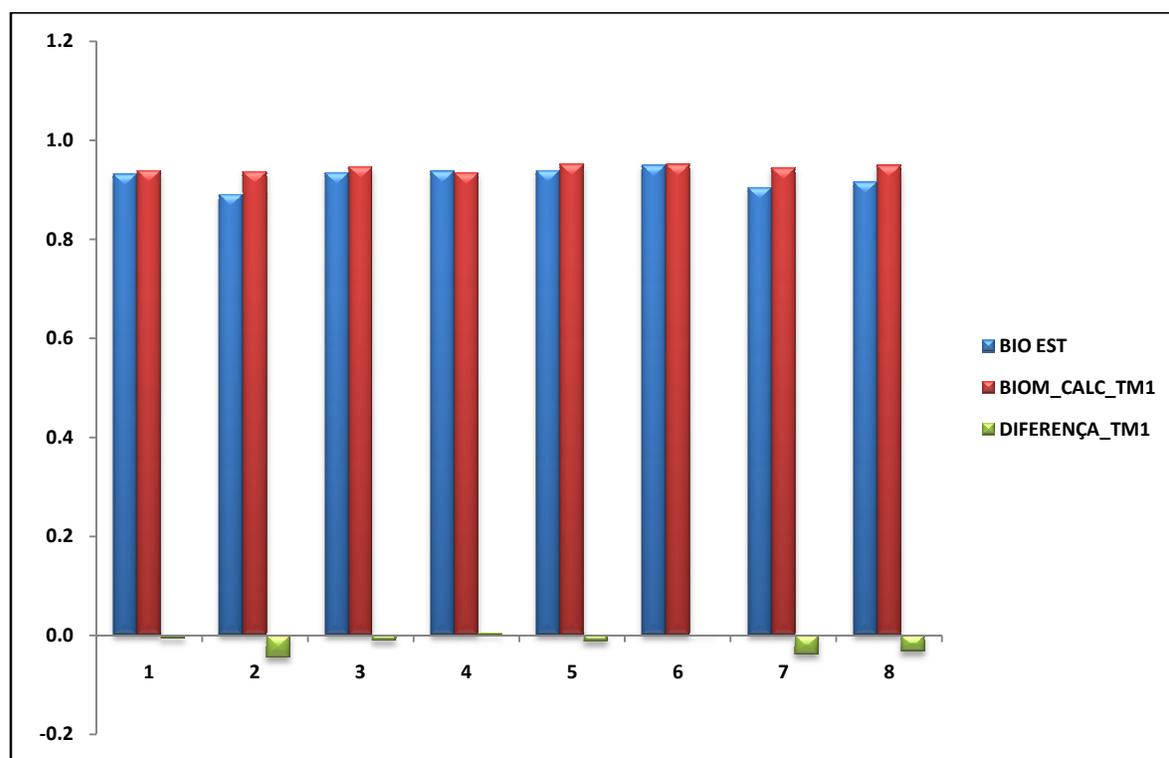


Figura 32: Gráfico com valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda TM1 do LANDSAT.

Os valores da quantidade de biomassa estimados, através dos dados de campo, e calculados, a partir da equação de regressão obtida com os dados da banda TM2 do LANDSAT, são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda TM2 do LANDSAT.

Talhão	BIO EST	BIO CAL	Diferença	Erro relativo(%)
T1	0,931	0,918	0,013	1,448
T2	0,890	0,950	-0,060	6,710
T3	0,934	0,951	-0,017	1,843
T4	0,937	0,940	-0,003	0,269
T5	0,939	0,952	-0,013	1,389
T6	0,950	0,951	-0,001	0,067
T7	0,904	0,917	-0,013	1,429
T8	0,916	0,947	-0,032	3,441

Conforme os dados apresentados na Tabela 40, observa-se que o maior erro relativo obtido foi para o talhão T2 (6,7%), sendo que o segundo maior erro foi para o talhão T8 (3,44%). O erro relativo médio nesta análise foi de 2,1%, sendo que, os valores foram, em sua maioria, superestimados. Na Figura 32, são apresentados, graficamente, os dados apresentados na Tabela 40.

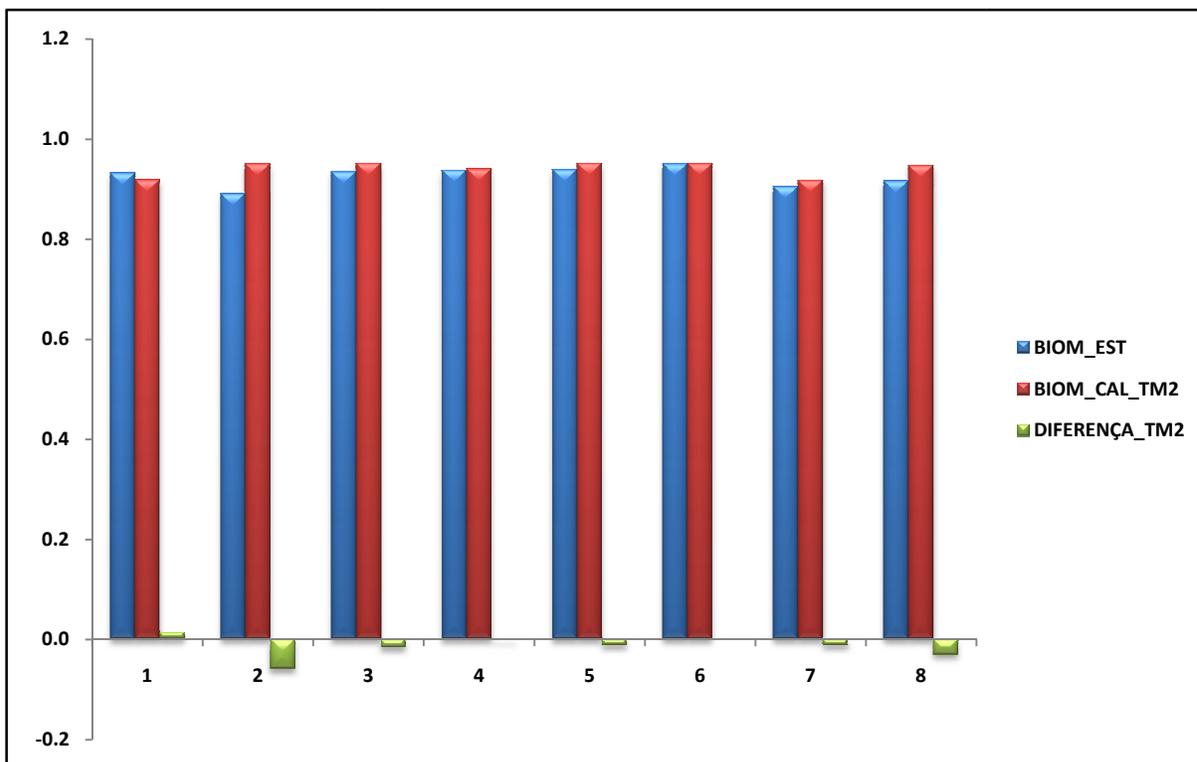


Figura 33: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda TM2 do LANDSAT.

Na Tabela 41, são apresentados os valores de biomassa estimados, através dos dados de campo, e os calculados a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda 1 do satélite QUICKBIRD.

Tabela 41: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 1 do QUICKBIRD.

Talhão	BIO EST	BIO CAL	Diferença	Erro relativo (%)
T1	0,931	0,929	0,003	0,296
T2	0,890	0,882	0,008	0,893
T3	0,934	0,945	-0,010	1,102
T4	0,937	0,929	0,008	0,865
T5	0,939	0,947	-0,008	0,894
T6	0,950	0,909	0,041	4,320
T7	0,904	0,944	-0,040	4,436
T8	0,916	0,952	-0,036	3,969

Na Tabela 41, observa-se que o maior erro relativo foi no talhão T7 (4,4%) e o menor foi no talhão T1 (0,3%), sendo que o erro relativo médio nesta análise foi de 2,1%. Metade das estimativas foi superestimada, metade foi subestimada. Os dados da Tabela 41 estão representados, graficamente, na Figura 34.

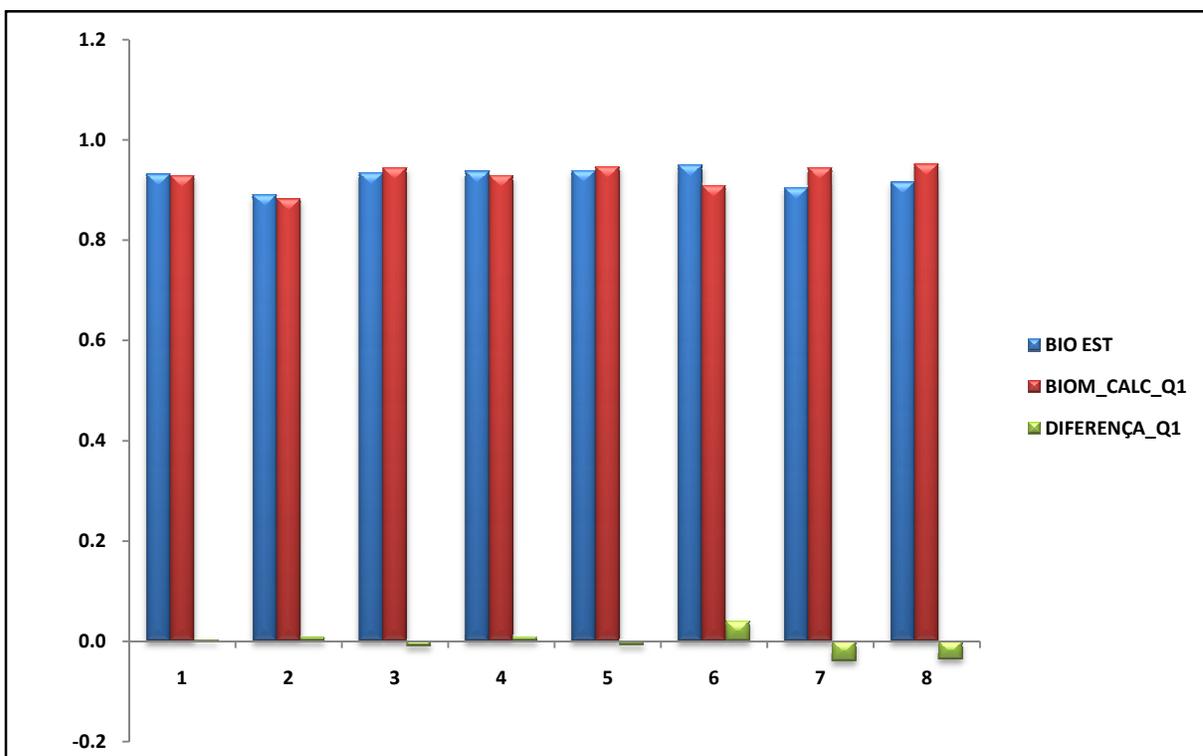


Figura 34: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda 1 do QUICKBIRD.

A Tabela 42 mostra os valores de biomassa estimada, a partir dos dados levantados em campo, e os calculados a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda 2 do satélite QUICKBIRD.

Tabela 42: Valores do parâmetro biomassa estimados (BIO EST) e calculados (BIO CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 2 do QUICKBIRD.

Talhão	BIO EST	BIO CAL	Diferença	Erro relativo(%)
T1	0,931	0,926	0,006	0,593
T2	0,890	0,915	-0,024	2,731
T3	0,934	0,951	-0,016	1,750
T4	0,937	0,952	-0,015	1,605
T5	0,939	0,950	-0,011	1,166
T6	0,950	0,941	0,009	0,921
T7	0,904	0,951	-0,047	5,154
T8	0,916	0,943	-0,027	2,999

Os dados da tabela 42 mostram que o maior erro relativo foi no talhão T7 (5,1%) e o menor foi no talhão T1 (0,6%), sendo a média dos erros de 2,1%. Na Figura 35, são representados, graficamente, os dados da Tabela 42.

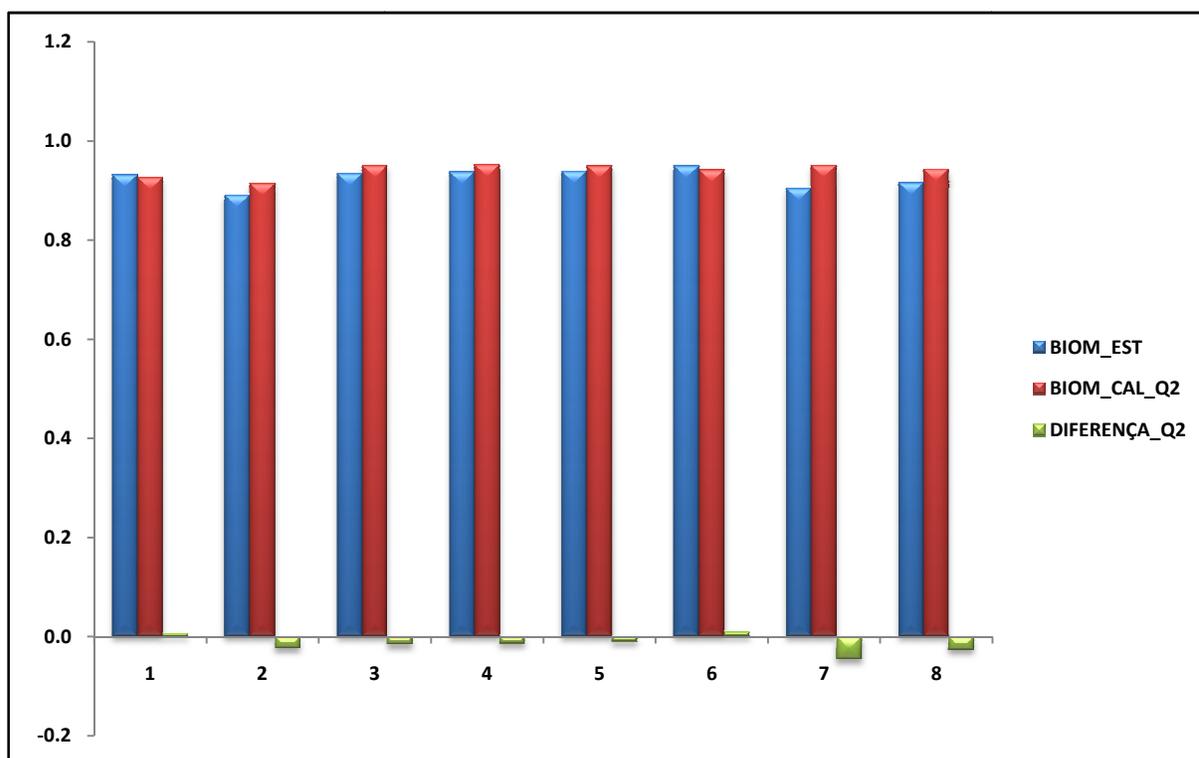


Figura 35: Gráfico com os valores de biomassa estimados, calculados e da diferença existente entre eles, para a banda 2 do QUICKBIRD.

Os modelos de regressão gerados para o parâmetro biomassa apresentaram bons resultados, com coeficientes de correlação elevados e valores baixos para os erros relativos médios (2,1% para as bandas 1 e 2 dos dois satélites). De acordo com a distribuição dos pontos, apresentada na Figura 24, e os resultados descritos acima, o modelo de regressão gerado a partir da banda TM2 do satélite LANDSAT mostrou-se mais promissor para a estimativa da biomassa em plantios de café.

4.4.1.3. Avaliação dos modelos gerados para a estimativa da altura

Os valores das alturas medidas em campo e calculadas, a partir da equação de regressão obtida com dados da banda TM1 do LANDSAT, são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43: Valores do parâmetro altura (ALT MED), medido em campo, e calculados (ALT CAL), a partir da equação de regressão dos dados banda TM1 do LANDSAT.

Talhão	ALT MED	ALT CAL	Diferença	Erro relativo (%)
T1	2,105	2,144	-0,039	1,835
T2	1,821	2,122	-0,301	16,503
T3	2,127	2,192	-0,065	3,066
T4	2,151	2,159	-0,008	0,379
T5	2,162	2,246	-0,084	3,885
T6	2,258	2,255	0,003	0,111
T7	1,910	2,242	-0,332	17,361
T8	1,987	2,213	-0,226	11,358

A partir da tabela 43, pode-se observar que o maior erro relativo foi no talhão T7 com 17,4%, e o menor foi no talhão T4 (0,4%) enquanto a média dos erros foi de 6,8%. Os dados da Tabela 43 estão representados, graficamente, na Figura 36.

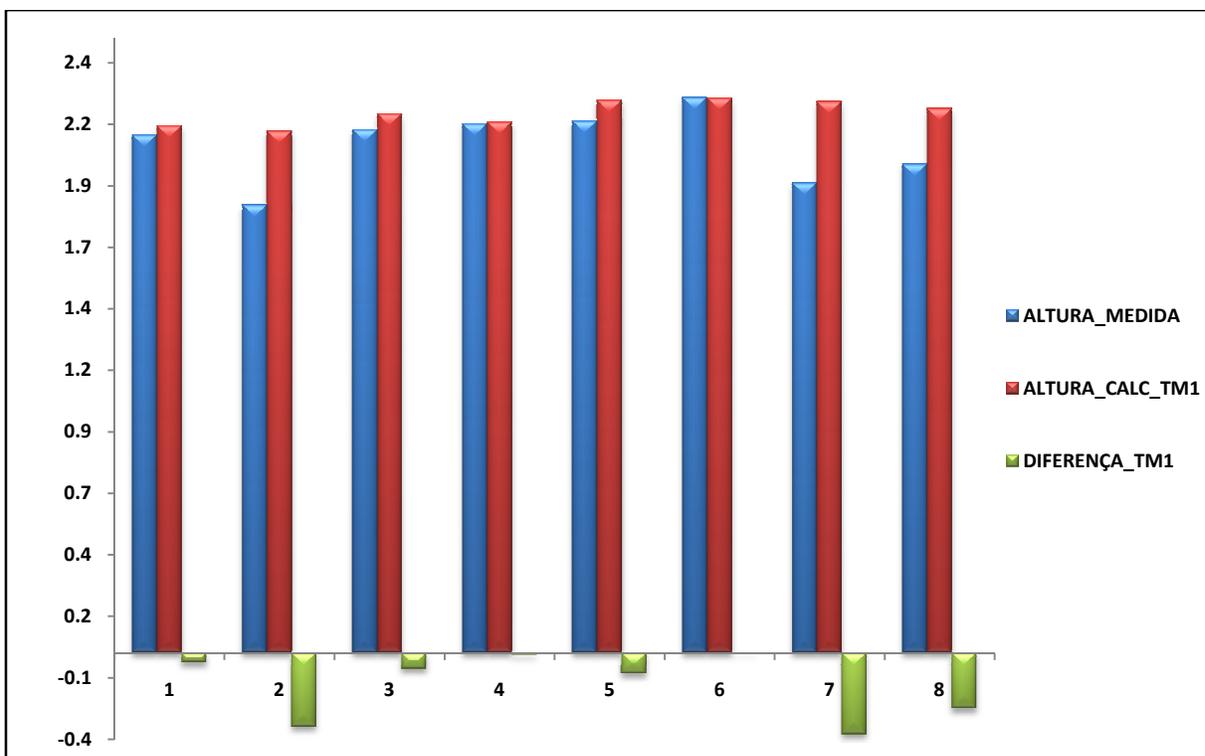


Figura 36: Gráfico com os valores das alturas medidas, calculadas e a diferença existente entre elas, para a banda TM1 do LANDSAT.

A Tabela 44 apresenta os valores das alturas, medidas em campo, e os calculados a partir da equação de regressão obtida com a utilização da banda 2 do satélite QUICKBIRD.

Tabela 44: Valores do parâmetro altura medido em campo (ALT MED) e calculados (ALT CAL) a partir da equação de regressão utilizando dados da banda 2 do QUICKBIRD.

Talhão	ALT MED	ALT CAL	Diferença	Erro relativo (%)
T1	2,105	2,082	0,023	1,092
T2	1,821	2,011	-0,190	10,428
T3	2,127	2,271	-0,144	6,779
T4	2,151	2,276	-0,125	5,817
T5	2,162	2,263	-0,101	4,683
T6	2,258	2,201	0,057	2,529
T7	1,910	2,265	-0,355	18,606
T8	1,987	2,215	-0,228	11,456

Na Tabela 44, o talhão T7 apresentou o maior erro relativo (18,6%) e o talhão T1 o menor, com 1,1%, sendo 7,6% a média. Os dados da Tabela 44 estão representados, graficamente, na Figura 37.

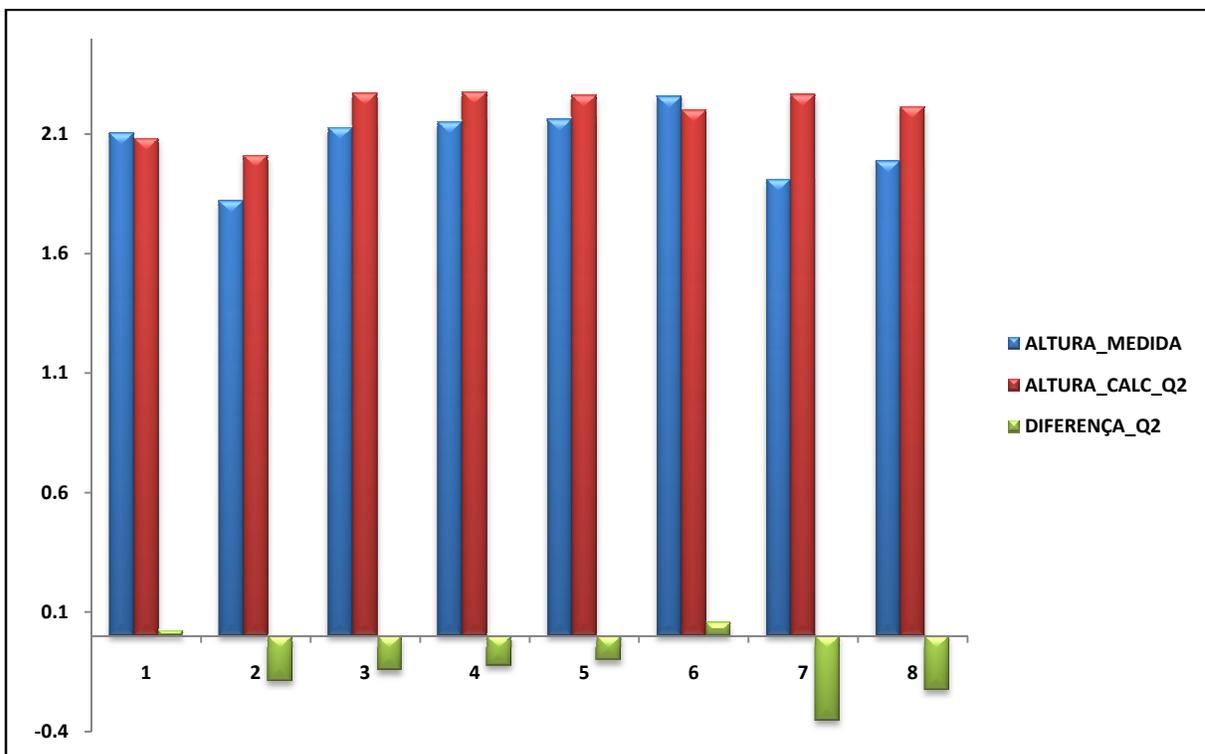


Figura 37: Gráfico com os valores das alturas medidas, calculadas e da diferença existente entre elas, para a banda 2 do QUICKBIRD.

Os valores das alturas foram, de modo geral, superestimados pelos dois modelos de regressão baseados na banda TM1 do LANDSAT e na banda 2 do QUICKBIRD.

5. CONCLUSÕES

1. Embora tenham sido definidos para satélites de baixa e média resolução espacial, os quatro índices de vegetação utilizados tiveram desempenhos coerentes na correlação com os parâmetros biofísicos considerados, quando calculados a partir de imagens de alta resolução espacial, possibilitando, assim, a sua utilização neste tipo de imagem, que deve ser cada vez mais disponível nos próximos anos.

2. Embora não tenha sido possível estabelecer uma relação que explicasse adequadamente a classificação feita para os talhões, com base nos parâmetros Altura, IAF, Porcentagem de cobertura e Biomassa, e os valores médios dos índices de vegetação utilizados, a melhoria da resolução espacial aumentou de 7 a 13 vezes a capacidade de diferenciação de plantios de café. Trata-se de característica da alta resolução espacial que pode ser de grande utilidade em procedimentos de classificação automática.

3. Parâmetros biofísicos, especificamente espaçamento entre plantas e linhas, diâmetro de copa, rugosidade e densidade populacional, não apresentaram correlações significativas, individualmente, com as bandas espectrais e os índices de vegetação utilizados, indicando serem parâmetros de difícil estimativa a partir de dados de satélites, mesmo os de alta resolução espacial. A melhoria da resolução espacial não trouxe vantagens significativas, neste caso.

4. Parâmetros biofísicos como altura, índice de área foliar e, principalmente, a biomassa, apresentaram regressões significativas com as bandas e os índices de vegetação utilizados, indicando serem parâmetros de estimativa possíveis a partir de dados de satélites, mesmo os de média resolução espacial como o TM/LANDSAT. A melhoria da resolução espacial também não trouxe vantagens significativas, neste caso. A utilização de modelos de

regressão baseados em equações não-lineares, principalmente o modelo exponencial cúbico, foi responsável pelos bons resultados obtidos neste caso. Trata-se de resultado relevante considerando a semelhança deste sistema com os satélites da série CBERS.

5. Apesar de terem sido obtidos quatro modelos de regressão múltipla significativos, eles são baseados em vários preditores de origem (satélites) e tipos (bandas e índices) diferentes, dificultando sua aplicação prática, principalmente ao comparar com os resultados obtidos pelos modelos de regressão que utilizam equações não-lineares.

6. Os resultados dos agrupamentos realizados, a partir da análise de componentes principais (ACP), permitiram separar plantios em produção de áreas em formação, tanto quando foram utilizadas imagens do QUICKBIRD quanto para imagens do TM/LANDSAT. Estes agrupamentos podem ser de grande utilidade na classificação automática de imagens.

7. A associação dos parâmetros biofísicos “porcentagem de cobertura” e “densidade populacional” foi a principal responsável pelos agrupamentos realizados através da análise de componentes principais (ACP) para os dois tipos de imagens utilizados. A definição de um índice agregando estes dois parâmetros pode ser de grande utilidade na classificação automática de áreas de café.

A utilização das imagens de alta e média resolução espacial permitiu, portanto, detectar características biofísicas dos cafezais que podem ser úteis no acompanhamento das safras de café no país. Apesar do avanço tecnológico proporcionado pelas imagens de alta resolução espacial, elas não se mostraram superiores a ponto de substituírem, mas complementarem as informações fornecidas pelas imagens de média resolução, que são cada vez mais acessíveis principalmente no Brasil com o sistema CBERS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M. **Estimativa de áreas agrícolas por meio de técnica de sensoriamento remoto, geoprocessamento e amostragem**. 2003. 183 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

ADAMI, M.; PINHEIRO, E.S.; MOREIRA, M.A. **Aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de imagens ETM+/Landsat-7 no mapeamento agrícola**. São José dos Campos: INPE, 2002. 41 p. <http://urlib.net/bol.com.br/mirian_cris/2003/01.17.09.38>. 10/02/2005.

ALFONSI, R.R. **Histórico climatológico da cafeicultura brasileira**. O Cafezal (Coffee Break): Informativo Garcafé, maio 2000. <<http://www.coffeebreak.com.br>>. 05/08/2006.

ALMEIDA, T.S; FONTANA, D.C.; MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H. Índice de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia, GO. **Anais...**Goiânia: INPE, p. 17-24, 2005.

ALVES, H.M.R.; LACERDA, M.P.C. Caracterização de agroecossistemas cafeeiros nas principais regiões produtoras no estado de Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003. **Anais...**Belo Horizonte: INPE, p. 11-17, 2003.

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

ASSAD, E.D., EVANGELISTA, B.A.; SILVA, F.A.M.; CUNHA, A.R.; ALVES, E.R.; LOPES, T.S.S.; PINTO, H.S.; ZULLO JR., J. Zoneamento agroclimático para a cultura de café (*Coffea arabica* L.) no estado de Goiás e sudoeste do estado da Bahia. **Rev. Bras. Agrometeorologia**. Passo Fundo, v. 9, n.3 Dez. 510-518, 2001.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2-3, p.161-173, 1991.

BATISTA, G.T; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C.; NOVAES, R.A.. **Uso de sensores remotos a bordo de satélites e aeronave na identificação e avaliação de áreas de culturas para fins de previsão de safras**. São José dos Campos: INPE, 1978. 46p. (Série Texto Técnico, INPE-1229-NTI/103).

BATISTA, G.T. ; DALLEMAND, J.F. ; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C. Avaliação de Dados SPOT HRV e Landsat TM na Discriminação de Culturas Agrícolas. **Revista Agropecuaria Brasileira**, v. 25, n. 3, p. 379-386, 1990.

BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; VANDERBILT, V.C. Spetral agronomic relationships of maize, soybean and wheat canopies. In: International colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, **Anais...** Avignon, 1981. Monfavet, INRA, p. 261-272, 1981.

BAUSCH, W.C.; HALVORSON, A.D.; CIPRA, J. Quickbird satellite and ground-based multispectral data correlations with agronomic parameters of irrigated maize grown in small plots. **Biosystems Engineering**, v.101, n.1, p. 306-315, 2008. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com>>.

BERTOLDO, M.A.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; OLIVEIRA, M.R.; MARQUES, H.S. Caracterização da cultura cafeeira em relação às classes de solos e declividade utilizando técnicas de geoprocessamento na região de São Sebastião do Paraíso-MG. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, p. 86-89, 2003.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CAMPOS, D.S.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SANTOS, N.T. Determinação da variabilidade espacial da produtividade na cafeicultura de montanha com o uso de imagens aéreas digitais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, p.16-21, 2005.

CARAMORI, P.H.; CAVIGLIONE, J.H.; WREGE, M.S.; GONÇALVES, S.L.; FARIA, R.T. ADROCIOLI FILHO, A; SERA, T; CHAVES, J.D.C.; KOGUISHI, M.S. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do café (coffea arábica L.) no estado do Paraná. **Rev. Bras. Agrometeorologia**. Passo Fundo, v.9, n.3, p 486-494, 2001.

CARRILHO, J.M.Z. **Deteção de mudanças da cobertura do terreno em uma região do cerrado**. 1996. 110p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA DO CAFÉ (CIC). **Safra de 2008 deve ter queda de 10% em relação a 2006 na região de Franca**.< <http://www.cicbr.org.br/noticias-detail.php?recordID=3968> >, 09/08/2008.

CHAVEZ, P.S.; MACKINNON, D.J. Automatic detection of vegetation changes in Southwes United States using remotely sensed images. **Photogrametric Engineering e Remote Sensing**, v.60, n.5, p.571-583, 1994.

CHEN, S.C.; TARDIN, A.T.; BATISTA, G.T. **Índice vegetativo e suas aplicações na agricultura**. São José dos Campos: INPE, 1986. 24p. (Série Texto Técnico, INPE-3912-MD/030).

COLLARES, J.E.R.; LAURIA, C.A.; CARRILHO, M.M. Pesquisa de previsão e acompanhamento de safras baseada em painéis de amostras de áreas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, Curitiba, 1993. **Anais...**Curitiba: INPE, p. 450-453, 1993.

COLOMBO, R.; BELLINGERI, D.; FASOLINI, D.; MARINO, C.M. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p.120-131, 2003.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira: café/safra 2008, quarta estimativa**. <http://www.cncafe.com.br/galeria/00000403_1%20PREVISAO%20SAFRA%202008%20-%20JANEIRO%202008_0.pdf>, 10/12/2008.

CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ (CNC). **História do café no Brasil**. <<http://www.cncafe.com.br/conteudo.asp?id=10>>, 06/07/2008.

COVRE, M. **Influência de parâmetros culturais de citros sobre os dados TM/LANDSAT**. 1989. 241p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos. 1989.

CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. ed. rev. Campinas: IIG/UNICAMP, 1992. 170p

DALLEMAND, J.F.; TARDIN, A.T.; BATISTA, G.T.; CHEN, S.C. Sensoriamento remoto e agricultura. **Ciência Hoje**, São Paulo, v.8, n.43, 1988.

DECHKA, J.A.; FRANKLIN, S.E.; WATMOUGH, M.D.; BENNETT, R.P.; INGSTRUP, D.W. Classification of wetland habitat and vegetation communities using multi-temporal Ikonos imagery in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.28, p.679-685, 2002.

DUARTE, W.O.; BRITO, J.L.N.S. Mapeamento da Cultura do Café no município de ARAGUARI-MG utilizando imagens do Sensor CCD do satélite CBERS-2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis, SC. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 161-167.

ENVI. **Environment for visualizing images**. <<http://www.envi.com.br>>. 15/10/2008.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5, 1988, Natal, RN. **Anais...**Natal: INPE, 1988.

EIPHANIO, J.C.N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A.R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.379-386, 1994.

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

EIPHANIO, J.C.N.; ALMEIDA JR, A.C.; FORMAGGIO, A.R. Desenvolvimento do trigo com dois índices de vegetação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador, BA. **Anais...**Salvador: INPE, p. 19-24, 1996b.

FAVARIN, J.L.; NETO, D.D.; GARCÍA, A.G.; NOVA, N.A.V.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.769-773, 2002.

FAZUOLI, L.C. A cultura do café. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Instruções técnicas para o Estado de São Paulo**. 5. ed. ver. atual. Campinas, 1990. 233p. (Boletim, 200).

FORMAGGIO, A.R.; TARDIN, A.T.; RUDORFF, B.; ASSUNÇÃO, G.V.; EIPHANIO, J.C.N.; MOREIRA, M.A.; CHEN, S.C.; DUARTE, V. **Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 1989, 217p.

FREITAS, S.R.; CRUZ, C.B.M. Análise de Componentes Principais e Modelo Linear de Mistura na discriminação de classes de vegetação na Mata Atlântica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1529-1536. CD-ROM, On-line. <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.04.11.55>>. 29/06/2008.

GAUSMAN, H.W.; GERBERMANN, A.H.; WIEGAND, C.L.; LEAMER, R.W.; RODRIGUEZ, R.R.; NORIEGA, J.R. Reflectance differences between crop residues and bare soils. **Soil Soil Science Society of America Proceedings**, v. 39, n.4, p. 752-755, 1973.

GOEL, N.S. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1989. Cap.6, p. 205-251.

GONÇALVES, R.R.V. **Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008**. 2008. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M.D., CLARK, J.A. **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworth, 1989, cap. 2, p. 19-43.

HAMADA, E. **Desenvolvimento fenológico do trigo (cultivar IAC24-tucuruí), comportamento espectral e utilização de imagens NOAA-AVHRR**. 2000. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HAIR, J.F.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W. **Multivariate Data Analysis: with readings**. 4.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1995, cap. 5-8, p. 256-483.

HEMERLY, F.X. **Cadeia produtiva do café no Estado de São Paulo: possibilidades de melhoria de sua competitividade no segmento agrícola**. 2000. 210p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N.C.; CLARKE, K.C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p.286-302, 2003.

HOBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 46, p.651-656, 1980.

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

IEA (Instituto de Economia Agrícola). Estimativa da safra agrícola do café. <http://www.iea.sp.gov.br/out/producao/prev_safra.php>, 23/11/2008.

IPPOLITI-RAMILO, G.A. **Imagens LANDSAT/TM da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**. 1998. 183p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

IPPOLITI-RAMILO, G.A.; EPIPHANIO, J.C.N.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.46, n.1, p. 89-101, 1999.

JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JR, P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. **Remote Sensing of Environment**, v.3, p.187-208, 1983.

JIAJU, L. Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n.12, p.1895-1907, 1988.

JOAQUIM, A.C. **Identificação de Variedades de Cana-de-açúcar em Três Classes Texturais de Solo Através da Análise de Nível de Cinza em Imagens LANDSAT/TM**. 1998. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

JOHNSON, L. F. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v.9, p.96-101, 2003.

JOHNSON, L.F.; ROCZEN, D.E.; YOUKHANA, S.K.; NEMANI, R.R.; BOSCH, D.F. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.38, p.33-44, 2003.

JONASSON, S. Evaluation of the point intercept method for the estimation of plant biomass. **Oikos**, v.52, p.101-106, 1989.

JORNAL DO CAFÉ. História do café. <http://www.jornaldocafe.com.br/scafe_historia.html>, 20/06/2008.

KNIPLING, G.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, p. 155-159, 1970.

LEONARDI, L. **Influência de parâmetros culturais de cafezais sobre o dados TM/LANDSAT-5**. 1990. 171p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

LEE, D.S.; SHAN, J.; BETHEL, J.S. Class-guided building extraction from Ikonos imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.69, p.143-150, 2003.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.M. **Remote sensing and image interpretation**. 3 ed. New York: J. Wiley, 1994. 750p. apud MOREIRA, R.C. **Influencia do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 2000.

LIU, W.T.H.; LIU, B.W.Y. Comparação entre três modelos de previsão de safra de café no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Cultura**, v.40, n.8, p.801-807, 1988.

MATIELLO, J.B. **O café do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320p.

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J.A. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**, v.24, n.6, p.1761-1770, 2002.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297p.

MINITAB. **User's Guide 2: data analysis and quality tolls**. USA: Minitab Inc., 1998.

MOREIRA, M.A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e parâmetros agrônômicos**. 1997. 142p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M., RUDORFF, B.F.T. Análise do comportamento espectral de café em imagens TM e ETM+ do Landsat 5 e 7. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003. **Anais...**Belo Horizonte: INPE, p. 189-196, 2003.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** Viçosa, MG: UFV, 2 ed., 307p., 2003.

NASCIMENTO, C.R. **Correção atmosférica de imagens do sensor AVHRR/NOAA utilizando produtos atmosféricos do sensor MODIS/TERRA.** 2006. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NOVO, E.M.M. **Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações.** 3. ed., São José dos Campos: Edgar Blücher Ltda, 1988. 308p.

OLIVEIRA, M.P.A. **Epressão de genes da biossíntese de cafeína em frutos e endospermas de *Coffea arabica*: sem cafeína.** 2007. 75p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

OZDARICI, A.; TURKER, M. Field-based classification of agricultural crops using multi-scale images. In: International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA), 1, 2006, Austria, Salzburg University. **Anais...** Austria: ISPRS, 7p., 2006. <http://www.commission4.isprs.org/obia06/Papers/18_Automated%20classification%20IC%20II%20-%20Agriculture/OBIA2006_Ozdarici_Turker.pdf> 04/10/2008.

PÁSCUA, D.M.S. **Cuantificación y valoración econômica Del servicio ambiental almacenamiento de carbono em sistemas agroflorestales de café em la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua.** 2002, 131p. Tese (Magister Scientiae). Centro Agronômico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica.

PELLEGRINO, G.Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar.** 2001. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PEREIRA, J.L.G.; BATISTA, G.T.; ROBERTS, D. Reflectância de coberturas vegetais na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Santos, 1996. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p.411-416.

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

PIMENTEL-GOMES, F. **A Estatística Moderna na Pesquisa Agropecuária.** Piracicaba: Potafos,. 1 ed., 162p. 1984.

PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do estado de São Paulo. Ver. Bras. Agrometeorologia, Passo Fundo, v. 9, n.3 dez, p. 495-500, 2001.

PONZONI, F.J.; REZENDE, A.C.P. Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.4, p.535-545, 2004

PONZONI, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília, UNB; Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

RAMIREZ, G.M. **Comparação entre imagens pancromáticas do satélite Ikonos-II e Landsat/ETM + na identificação de plantios de café (*Coffea arabica*)**. 2002. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAMIREZ, G.M.; ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.C. Utilização de imagens pancromáticas do satélite Ikonos-II na identificação de plantios de café. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 223-229.

RAMIREZ, G.M.; ZULLO JR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Comparação de dados do satélite Ikonos-II e Landsat/ETM+ no estudo de áreas cafeeiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.41, n.4 p. 661-666, 2006

READ, J.M.; CLARK, D.B.; VENTICINQUE, E.M.; MOREIRA, M.P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, v.40, p.592-600, 2003.

RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 43, n. 12, p. 1541-1552, 1977.

ROBINOVE, C.J. Computation with physical values from LANDSAT digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.5, p.309-317, 1982.

ROSA, V.G.C. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do estado de Minas Gerais**. 2007. 145 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3, 1973, Washington, DC. **Proceedings....EUA: NASA**, 1973. p. 309-317.

RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A.; OVIEDO, A.; FREITAS, J.G.. Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo. In: Simpósio Latino Americano de Percepción Remota, 8, Venezuela. **Anais...Mérida: Venezuela**, p. 1-9, 1997.

SAES, M.S.M. **A racionalidade econômica da regulamentação no mercado brasileiro de café**. 1995. 164p. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SALGADO, D.D.A. **Modelo estatístico para predição de bem-estar de reprodutoras de frango de corte baseado em dados de ambiente e análise do comportamento**. 2006. 113p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SANCHES, I.D.A.; GÜRTLER, S.; FORMAGGIO, A.R. Discriminação de variedades de citros em imagens CCD Cbers-2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Goiânia. **Anais...Goiânia: INPE**, p.277-284, 2005.

SANTOS, C. **Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem**. 1ed., Lisboa: Edições Sílabo, 2007, 264p.

SANTOS, M.A. **Construção de cenários em ambiente SIG para avaliar mudanças de uso das terras induzidas por usinas hidrelétricas na região agrícola de Andradina**. 2003. 153p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SEDIYAMA, G.C.; MELO JR, SANTOS, A.R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N.; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*coffea arábica* L.) no estado de Minas Gerais. **Rev. Bras. Agrometeorologia**, passo fundo, v. 9, n. 3 dez., p. 501-509, 2001

SHRIVASTAVA R.J.; GEBELEIN, J.L. Land cover classification and economic assessment of citrus groves using remote sensing. **Journal of Photogrammetry e Remote Sensing (ISPRS)**, v. 61, n,1, p.341-353, 2007.

SIRTOLI, A.E. **Detecção da expansão de área de mineração através de técnicas de sensoriamento remoto**. 1998. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SONG, C.; WOODCOCK, C.E. The spatial manifestation of forest succession in optical imagery: the potential of multiresolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.82, p.271-284, 2002.

SOUZA, C.L.; PONZONI, F.J. Considerações sobre transformações de dados orbitais para estimativa do índice de área foliar (IAF). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, Salvador, 1996. **Anais...Salvador:INPE**, p.108-122, 1996.

SPIEGEL, M.R. **Estatística: resumo da teoria**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 1977, 580p.

SUGUMARAN, R.; ZERR, D.; PRATO, T. Improved urban land cover mapping using multi-temporal IKONOS images for local government planning. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.28, p.90-95, 2002.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; HERMAN, M.; MORCLETTE, J.J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P.Y. Description of a Computer Code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S Code. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.4, p.659-668, 1990.

TARDIN, A.T.; ASSUNÇÃO, G.V.; SOARES, J.V. **Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas – MG**. São José dos Campos: INPE, 1990. 17p (Série Texto Técnico, INPE-5066-RPE/622).

THOMAZIELLO, R.A. **O cultivo de cafeeiro em sistema adensado**. <<http://www.coffeebreak.com.br/ocafezal.asp?SE=8&ID=146>>. 11/02/2008.

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

TURNER, C.L.; SEASTEDT, T.R.; DYER, M.I.; KITTEL, T.G.F.; SCHIMEL, D.S. Effects of management and topography on the radiometric response a tallgrass prairie. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n.17, p.18855-18866, 1992

TURNER, D.P.; COHEN, W.B.; KENNEDY, R.E.; FASSNACHT, K.S.; BRIGGS, J.M. Relationships between leaf area index and Lansat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, v.70, p.58-68, 1999.

USTIN, S.L., ROBERTS, D.A., GREEN, R.O., ZOMER, R.J., GARCIA, M. Remote sensing methods monitor natural resources. **Photonics Spectra**, v.33, n.10, p. 108-113, 1999.

VELLOSO, M.H. **Coffee inventory through orbital imagery**. Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1974. 20p.

VELLOSO, M.H.; SOUZA, D.D. **Trabalho experimental de inventariação automática de cafezais utilizando imagens orbitais e o equipamento de Imagem-100**. Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1978. 2p.

VIEIRA, T.G.C.; LACERDA, M.P.C.; ALVES, H.M.R. Imagens orbitais aplicadas ao levantamento da cultura do café em Minas Gerais. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Belo Horizonte, 2001. **Anais...**Belo Horizonte, 2001. 86-89p.

VIEIRA, T.G.C., ALVES, H.M.R., LACERDA, M.P.C. Parâmetros culturais para avaliação do comportamento espectral da cultura do café (coffea arábica) em Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 247-254. CD-ROM, Online. ISBN 85-17-00017-X. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.14.17.41>>. 22/10/2006.

VOLPATO, M.M.L. **Imagens AVHRR-NOAA para determinação do potencial de incêndios em pastagens**. 2002. 97p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WATRIN, O.S.; VALÉRIO FILHO, M.; SANTOS, J.R. Transformação por componentes principais e por decorrelação de bandas aplicadas à caracterização de feições da paisagem do nordeste paraense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador, BA. **Anais...**Salvador: INPE, 1996.

WU, J.; WANG, D. BAUER, M. E. Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland. **Remote Sensing of Environment**, v.99, n.1, p.315-325, 2005.

WU, J.; WANG, D.; BAUER, M.E. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. **FieldCrops Research**, v. 102, n.1, 2007. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com>>.

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. **Using high resolution QuickBird satellite imagery for cotton yield estimation**. In: ASAE/CSAE Meeting Paper, nº 041119. St. Joseph, Mich.: ASAE, p.1-12, 2004.

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. Comparison of QuickBird satellite imagery and airborne imagery for mapping grain sorghum yield patterns. **Precision Agriculture**, v.7, n.1, p.33-44, 2006.

ZULLO JR, J.; ARRUDA, F. B. **Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1986. 23p. (Boletim Técnico n.113).

ZULLO JR., J. **Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações**. 1994. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

APÊNDICE



Foto 1: Detalhe da planta de café mostrando estado vegetativo da cultura no período de aquisição das imagens de satélite.



Foto 2: Detalhe da planta de café mostrando estado vegetativo da cultura no período de aquisição das imagens de satélite.