



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**COMPORTAMENTO ESPECTRO-TEMPORAL DA
CULTURA DO FEIJÃO, POR MEIO DE DADOS
OBTIDOS POR ESPECTRORADIOMETRIA, CÂMERA
DIGITAL E IMAGEM ASTER**

RAÍSSA DE ALMEIDA PAPA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

BRASÍLIA/DF

AGOSTO/2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**COMPORTAMENTO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO FEIJÃO, POR
MEIO DE DADOS OBTIDOS POR ESPECTRORADIOMETRIA, CÂMERA
DIGITAL E IMAGEM ASTER**

RAÍSSA DE ALMEIDA PAPA

ORIENTADORA: MARILUSA PINTO COELHO LACERDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PUBLICAÇÃO: 329/2009

BRASÍLIA/DF
AGOSTO/2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**COMPORTAMENTO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO FEIJÃO, POR
MEIO DE DADOS OBTIDOS POR ESPECTRORADIOMETRIA, CÂMERA
DIGITAL E IMAGEM ASTER.**

**RAÍSSA DE ALMEIDA PAPA
MATRÍCULA: 2007/56202**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À FACULDADE DE AGRONOMIA
E MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS AGRÁRIAS NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GESTÃO SOLO E ÁGUA.**

APROVADA POR:

**MARILUSA PINTO COELHO LACERDA, Dra. Professora Adjunta (FAV – UnB)
(Orientadora) CPF: 434.760.586-20; E-mail: marilusa@unb.br**

**SEBASTIÃO ALBERTO DE OLIVEIRA, Dr. Professor Associado (FAV – UnB)
(Examinador interno) CPF: 052.361.771-20; E-mail: oliveira@unb.br**

**EDSON EYJI SANO, PhD. Pesquisador (Examinador externo)
Embrapa Cerrados. CPF: 033.617.098-06; E-mail: sano@cpac.embrapa.br**

BRASÍLIA, 28 DE AGOSTO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Papa, Raíssa de Almeida

Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectralradiometria, câmera digital e imagem ASTER. / Raíssa de Almeida Papa; orientação de Marilusa Pinto Coelho Lacerda. Brasília, 2009.

132 p. :il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2009.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Mapeamento Agrícola. 3. Comportamento Espectral. 4. Cultura do Feijão. I. Papa, R. A. de II. Comportamento espectro-temporal da cultura de feijão, por meio de espectralradiometria, câmera digital e imagem ASTER.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PAPA, R. A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectralradiometria, câmera digital e imagem ASTER.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2009, XXX p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Raíssa de Almeida Papa.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento espectro-temporal da cultura de feijão, por meio de dados obtidos por espectralradiometria, câmera digital e imagem ASTER.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Raíssa de Almeida Papa

CPF: 989.967.031-68

Tel: (61) 9955-5509/3368-3678

E - mail: raissapapa@gmail.com

*Ao meu filho, Eduardo,
meu amor,
minha alegria e
minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

À minha mãe Rúbia, ao meu pai Marcos e aos meus irmãos, Uriel, Daniel e Marcel pelo amor, carinho e incentivo.

À professora Marilusa Lacerda por todos esses longos anos de convivência e orientação, que começaram na graduação e vão durar mais longos anos! Obrigada por ter me incentivado a fazer o mestrado!

Ao professor Dr. Sebastião Alberto de Oliveira e ao pesquisador Edson Eyji Sano por terem aceitado participar da minha banca examinadora.

Ao professor Osmar Abílio por ter disponibilizado o espectroradiômetro do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) para a aquisição de dados deste trabalho.

Ao Antônio Felipe Couto Júnior pela disposição em me ajudar, por ter me acompanhado na coleta de amostras no campo e pelas aquisições dos dados com o espectroradiômetro.

Ao Vinícius Vasconcelos por ter me ajudado na coleta de amostras no campo.

Ao técnico da Emater do Núcleo Rural Jardim, Mateus Miranda, por ter disponibilizado seu tempo para me ajudar na seleção da fazenda que seria utilizada no estudo, e por estar sempre disposto a me ajudar.

Ao pesquisador Djalma Sousa por ter disponibilizado o Laboratório de Física dos Solos da Embrapa Cerrados para a realização da análise de teor da matéria orgânica dos solos estudados.

À Vanessa Cenci, proprietária da Fazenda Santa Tereza, por ter disponibilizado a sua propriedade para a realização deste estudo, e sempre me ajudar na busca dos dados históricos das culturas plantadas na fazenda.

À minha querida amiga Patty por ter me ajudado na marcação dos pontos de amostragem no pivô e na coleta das amostras de solos.

Ao meu compadre, Marcão, que foi um padrinho e tanto para o Eduardo, ao cuidar dele enquanto eu assistia as aulas do mestrado! E por ter me ajudado na coleta de solos no pivô, mesmo sem material próprio para tal fim! Obrigada mesmo!

À Inara Barbosa pela grande ajuda na etapa de classificação das imagens e com as ferramentas do ArcGis! Mesmo com a sua rapidez, eu consegui aprender muito, sendo muito importante para a continuidade do trabalho.

À Marina Bilich pelos incentivos, conselhos, pela companhia no Laboratório de Geoprocessamento, por ter me ajudado com o Surfer 7.0 e por estar sempre disposta a tirar as minhas dúvidas.

Às minhas queridas amigas Borinha (comadre I), Bárbara (comadre II), Jú, Cricricota e Fran, pela amizade, incentivo, conselhos e companheirismo em todos os momentos.

Um agradecimento especial à todos que cuidaram do meu filho enquanto eu escrevia esta dissertação! Muito obrigada!

ÍNDICE

Capítulos/Sub-capítulos.....	Página
RESUMO GERAL	XV
GENERAL ABSTRACT	XVI
I. INTRODUÇÃO GERAL	1
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
II. 1. A cultura do feijão	4
II. 2. Sensoriamento Remoto	8
II. 3. Sensor ASTER	16
II. 4. Processamento digital de imagens de satélite - PDI.....	20
II. 5. Sensoriamento hiperespectral.....	22
II. 5. 1. Spectral Angle Mapper - SAM.....	24
II. 5. 2. Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME.....	25
II. 6. Espectroradiometria.....	27
II. 7. Características Espectrais.....	30
II. 7. 1. Características espectrais das culturas agrícolas	30
II. 7. 2. Características espectrais das folhas	31
II. 7. 3. Características espectrais dos solos	33
II. 8. Sensoriamento remoto aplicado na elaboração de cartas de cobertura do solo	35
II. 9. Sistemas de Informações Geográficas (SIG's)	36
II. 10. Mapeamento terrestres por Sistema de Posicionamento Global GPS x Mapeamento terrestre por imagens de satélites.....	37
III. OBJETIVOS.....	39
III. 1. Geral	39
III. 2. Específicos	39
IV. JUSTIFICATIVA.....	39
V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
CAPÍTULO ÚNICO	58
RESUMO.....	59
ABSTRACT	60
I. INTRODUÇÃO	61
II. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
II. 1. Caracterização das áreas de estudo.....	64
II. 1. 1. Núcleo Rural Jardim – Distrito Federal (DF).....	64

II. 1. 2. Cristalina – Goiás (GO)	68
II. 2. Avaliação dos solos	70
II. 2. 1. Análise morfológica.....	70
II. 2. 2. Análises laboratoriais.....	70
II. 2. 2. 1. Análise química (matéria orgânica)	70
II. 2. 2. 2. Análise física (textura do solo)	71
II. 3. Confecção de mapas a partir dos dados laboratoriais dos solos.....	71
II. 4. Classificação das fotografias digitais verticais.....	71
II. 5. Determinação da curva espectral da cultura do feijão	72
II. 5. 1. Determinação da curva espectral da cultura do feijão por meio do espectrorradiômetro	72
II. 5. 2. Determinação da curva espectral do feijão por meio do sensor ASTER.....	73
II. 6. Pré-Processamento das imagens ASTER	73
II. 7. Determinação dos membros finais (<i>endmembers</i>)	74
II. 8. Classificação espectral da imagem ASTER.....	74
II. 8. 1. Método SAM (Spectral Angle Mapper)	74
II. 8. 2. Método MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral)	75
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
III. 1. Avaliação dos solos	77
III. 1. 1. Análise morfológica	77
III. 1. 2. Análises laboratoriais	78
III. 1. 2. 1. Análise química (matéria orgânica).....	78
III. 1. 2. 2. Análise física (textura do solo).....	80
III. 2. Classificação das fotografias verticais.....	84
III. 3. Determinação da curva espectral da cultura do feijão.....	103
III. 3. 1. Determinação da curva espectral por meio de espectrorradiômetro.....	103
III. 3. 2. Determinação da curva espectral do feijão por meio do sensor ASTER.....	105
III. 4. Classificação espectral da imagem de satélite do sensor ASTER	107
III. 4. 1. Método SAM (Spectral Angle Mapper)	107
III. 4. 1. 1. Núcleo Rural Jardim, Distrito Federal	107
III. 4. 1. 2. Cristalina, Goiás.....	112
III. 4. 2. Método MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral)	114
III. 4. 2. 1. Núcleo Rural Jardim, Distrito Federal	114
III. 4. 2. 2. Cristalina, Goiás.....	117

IV. CONCLUSÕES.....	121
V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXO I	129

LISTA DE FIGURAS

Capítulo Geral

Figura	Página
Figura 1. Identificação do campo de visada e campo de visada instantânea da imagem terrestre.	15
Figura 2. Comparação entre canais espectrais dos sensores ASTER e TM.	18
Figura 3. Resposta espectral da vegetação com folhas verdes.....	32
Figura 4. Curvas espectrais dos horizontes A e B de um Latossolo Vermelho distroférico típico (a) e de um Latossolo Amarelo ácrico típico (b).	35

Capítulo Único

Figura	Página
Figura 1. Imagem do sensor ASTER com a localização das áreas sob pivô central cultivados com feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) na Fazenda Santa Tereza, inserida no Núcleo Rural Jardim, DF.	66
Figura 2. Identificação dos pontos de amostragem do pivô central de número 11.	67
Figura 3. Imagem do sensor ASTER com a localização dos pivôs centrais de cultura permanente e porte alto na área do município de Cristalina, GO.	69
Figura 4. <i>Endmembers</i> utilizados para fazer a classificação SAM na imagem de satélite do sensor ASTER da área de estudo.	75
Figura 5. <i>Endmembers</i> utilizados para fazer o MLME na imagem de satélite do sensor ASTER da área de estudo.	76
Figura 6. Resposta espectral do solo da área estudada no pivô central de nº 11 obtida pelo sensor hiperespectral, FieldSpec@3 no dia 28/10/2008.	77
Figura 7. Mapa de teor de matéria orgânica (g.kg^{-1}) do pivô central nº 11.	80
Figura 8. Mapa de distribuição dos teores de argila das amostras de solo do pivô central nº 11.	83
Figura 9. Mapa de distribuição dos teores de areia das amostras de solo do pivô central nº 11.	83
Figura 10. Fotografias verticais dos pontos 09 (a) e 17 (b) (com plantio realizado no dia 28/09/2008); 03 (c) e 19 (d) (com plantio realizado no dia 24/09/2008). As fotografias foram tiradas no dia 24/10/2008.	88
Figura 11. Classificação supervisionada do ponto 09, fotografado no dia 24/10/2008 (26 dias após o plantio).	89

Figura 12. Classificação supervisionada do ponto 17, fotografado no dia 24/10/2008 (26 dias após o plantio).....	90
Figura 13. Classificação supervisionada do ponto 19, fotografado no dia 24/10/2008 (30 dias após o plantio).....	91
Figura 14. Classificação supervisionada do ponto 03, fotografado no dia 24/10/2008 (30 dias após o plantio).....	92
Figura 15. Fotografias verticais dos pontos 09 (a) e 17 (b) (com plantio realizado no dia 28/09/2008); 03 (c) e 19 (d) (com plantio realizado no dia 24/09/2008). As fotografias foram tiradas no dia 09/12/2008.....	97
Figura 16. Classificação supervisionada do ponto 09, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).....	98
Figura 17. Classificação supervisionada do ponto 17, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).....	99
Figura 18. Classificação supervisionada do ponto 19, fotografado no dia 09/12/2008 (76 dias após o plantio).....	100
Figura 19. Classificação supervisionada do ponto 03, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).....	101
Figura 20. Curvas espectrais do solo, palhada e folhas de feijão, obtidas pelo sensor hiperespectral, FieldSpec®3 a partir do dia 28/10/2008.	103
Figura 21. Curvas espectrais da folha de feijão obtidas pelo sensor hiperespectral, FieldSpec®3 a partir do dia 09/12/2008.....	104
Figura 22. Comparação de duas curvas espectrais, reamostradas para o sensor ASTER, em diferentes estágios fenológicos.	106
Figura 23. Resultado da classificação Spectral Angle Mapper (SAM) do Núcleo Rural Jardim - DF, utilizando dois ângulos (0,25 e 0,30 radianos).	111
Figura 24. Resultado da classificação Spectral Angle Mapper (SAM) da área estudada no município de Cristalina - GO, utilizando dois ângulos (0,25 e 0,30 radianos)....	113
Figura 25. Imagem classificada pelo Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e Isodata (classificação não-supervisionada) do Núcleo Rural Jardim – DF.....	116
Figura 26. Imagem classificada pelo Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e Isodata (não-supervisionada) do município de Cristalina - GO.	119
Figura 27. Imagem RMSE (imagem erro) do Núcleo Rural Jardim – DF e da área estudada no município de Cristalina – GO.	120

LISTA DE TABELAS

Capítulo Geral

Tabela	Página
Tabela 1. Calendário de plantio e colheita do feijão de 1ª safra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil.	5
Tabela 2. Calendário de plantio e colheita do feijão de 2ª safra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil.	5
Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético.	9
Tabela 4. Características dos satélites e imagens orbitais comumente usadas na extração de informações terrestres.	13
Tabela 5. Resolução espectral e espacial das quatorze bandas espectrais do sensor ASTER. .	17

Capítulo Único

Tabela	Página
Tabela 1. Resultado da análise morfológica do atributo cor do solo nos pontos amostrais do pivô central nº 11.....	78
Tabela 2. Resultado da análise de matéria orgânica do solo nos pontos amostrais do pivô central nº 11.....	79
Tabela 3. Análise textural das amostras de solos do pivô central nº 11.	82
Tabela 4. Área em metros quadrados (m ²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 24/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 24/10/2008.	86
Tabela 5. Área em metros quadrados (m ²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 28/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 24/10/2008.	87
Tabela 6. Área em metros quadrados (m ²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 24/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 09/12/2008.	95
Tabela 7. Área em metros quadrados (m ²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 28/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 09/12/2008.	96

LISTA DE SIGLAS

<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>	ASTER
Distrito Federal.....	DF
Modelo Linear de Mistura Espectral.....	MLME
Processamento digital de imagens.....	PDI
Radiação eletromagnética.....	REM
Sistema de Informação Geográfica.....	SIG
<i>Spectral Angle Mapper</i>	SAM

COMPORTAMENTO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO FEIJÃO, POR MEIO DE DADOS OBTIDOS POR ESPECTRORADIOMETRIA, CÂMERA DIGITAL E IMAGEM ASTER

RESUMO GERAL

O monitoramento da produção agrícola no Brasil é uma atividade difícil, devido, principalmente, à grande extensão de áreas plantadas e ao seu complicado acesso. Por isso, o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na identificação das culturas agrícolas e contribuam para a previsão de safras é importante. As imagens de satélite auxiliam na extração de informações dos recursos naturais da Terra de maneira relativamente precisa, rápida e econômica. Sensores remotos mais novos como o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), cujas imagens podem ser manipuladas e interpretadas por metodologia de imagens hiperespectrais, fornecem dados ainda mais precisos. Na agricultura, no entanto, essa metodologia tem sido pouco aplicada, apesar do grande potencial desta para estudos de monitoramento e mapeamento da ocupação agrícola das terras, cuja demanda é cada vez mais crescente em função do grande desenvolvimento do setor no Brasil, particularmente na região Centro-Oeste. A utilização de dados de reflectância, obtidos por meio de espectroradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas diversificadas, possibilitando o estabelecimento de metodologia para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos de culturas agrícolas. O presente estudo teve como objetivo estabelecer o comportamento espectral para a individualização da cultura do feijão, afim de fornecer dados para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos dessa cultura no Distrito Federal e outras regiões afins, mediante uso de técnicas de sensoriamento remoto.

Palavras Chave: Geoprocessamento, monitoramento e mapeamento agrícola, comportamento espectral, feijão, Distrito Federal, Cristalina – GO.

SPECTRO FLAW-BEHAVIOR OF THE BEAN CROP BASED ON DATA OBTAINED BY SPECTROMETER, DIGITAL CAMERA AND ASTER IMAGE

GENERAL ABSTRACT

The monitoring of agricultural production in Brazil is a difficult activity, mainly due to large planted areas and complicated access. Therefore the development of techniques that helps in the crops identification and contribute to the yield prediction are important. The satellite images helps to extract information from Earth's natural resources on a relatively precise, fast and economical way. Newer remote sensors such as ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), whose images can be manipulated and interpreted by hyperspectral images methods, provide more accurate data. In agriculture, however, this methodology has been rarely applied, despite the great potential of this for studies of monitoring and mapping of the agricultural land, whose demand is increasingly in the light of the great development of the sector in Brazil, particularly in the Midwest region. The use of reflectance data, obtained by spectrometer, allows obtaining the spectral response patterns of different crops, allowing the establishment of surveys methodology for monitoring and mapping of agricultural crops. This study aimed to determine the spectral behavior to individualize the culture of the bean, to provide data for surveys, monitoring and mapping the crop in the Distrito Federal and other related areas, using remote sensing techniques.

Keywords: Geoprocessing, agricultural monitoring and mapping, spectral behavior, beans, Distrito Federal, Cristalina - GO.

I. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a agricultura contribui com um terço do Produto Interno Bruto (PIB) e é considerada uma alavanca importante para o desenvolvimento do país (Gasques et al., 2004). Os produtos agrícolas, in natura ou processados, atingem 31% das exportações brasileiras (Ferreira, 2000). O saldo da balança comercial dos agronegócios no Brasil quadruplicou em 2004, quando comparado com o de 1997, atingindo o valor de 95,3 bilhões de reais (Souza et al., 2006). Considerando a grande dimensão da agricultura no Brasil, faz-se importante o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na identificação das culturas agrícolas, contribuindo, assim, para a previsão de safras (Pino, 1999). No entanto o monitoramento da produção agrícola é difícil devido, principalmente, à grande quantidade de áreas plantadas e ao seu complicado acesso.

Atualmente, com a possibilidade de extrair informações da superfície da Terra por meio de sensores a bordo de satélites, a agricultura está potencializando cada vez mais a probabilidade de conceder resultados positivos ao PIB nacional. As técnicas tradicionais aliadas às novas metodologias estão revolucionando o mercado em todos os níveis, proporcionando rentabilidade, segurança e continuidade ao setor (Globalsat, 2009).

O sensoriamento remoto existe há mais de 30 anos, porém, foi nos últimos 15 anos que sua utilização se intensificou nas áreas civil e mercadológico. Na agricultura, seu uso comercial é ainda mais recente. O sensoriamento remoto é a área do conhecimento que engloba um conjunto de tecnologias que visam a aquisição de informações de um alvo por intermédio de sensores. No caso da agricultura, os alvos são as áreas agrícolas, que incluem solo, cultivos e água. Os sensores utilizados para uso em agricultura são geralmente os de imageamento, como os orbitais, aerotransportados e os terrestres (Globalsat, 2009).

O conhecimento das interações de radiação solar com a vegetação é fundamental para a interpretação de dados de sensoriamento remoto, bem como para desenvolvimento de novos sensores e metodologias de análise. A parte do organismo vegetal envolvida nessa interação é referida como dossel, constituído por um conjunto estruturado de folhas, caules, espigas, flores entre outros, conforme o tipo e as condições da planta. Sob o ponto de vista do sensoriamento remoto, um determinado tipo de dossel é caracterizado pela sua constituição, pelo comportamento espectral de seus componentes, sua estrutura interna e sua organização no espaço (Valeriano, 2003).

Devido à constituição com estruturas fotossintetizantes, as folhas têm grande importância na interação do fluxo radiante com a vegetação (Valeriano, 2003). Os pigmentos fotossintéticos (clorofilas a, b e total, carotenóides) são essenciais para o desenvolvimento das

plantas, por serem responsáveis pela captura da energia solar incidente necessária à fotossíntese. Com o desenvolvimento do sensoriamento remoto hiperespectral a partir da década de 1980, verificou-se a possibilidade de quantificar estes pigmentos individualmente em grandes extensões de lavouras agrícolas (Dawson et al., 1998a e b; Fourty e Baret, 1998; Martin et al., 1998; Dawson et al., 1999; Jago et al., 1999, Kokaly e Clark, 1999 e Gitelson et al., 2002).

Estas informações auxiliam na determinação do estado fisiológico da vegetação, tal como na detecção de estresses, na discriminação de espécies e monitoramento das características fenológicas, além da estimativa da produtividade, por meio da medição e interpretação da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Blackburn, 1998 a e b).

As imagens de satélite são utilizadas para extrair informações dos recursos naturais da Terra de maneira relativamente precisa, rápida e econômica. Desta forma, o sensoriamento remoto pode ser visto como um importante sistema de aquisição de informações para as diversas áreas do conhecimento, entre elas as ciências agrárias, sendo uma técnica rápida e menos onerosa, não apenas para uso agrícola como, também, para estudos ambientais (Genú, 2006).

Além de serem empregadas para discriminação de espécies agrícolas, as técnicas de sensoriamento remoto, também, vêm sendo utilizadas para estudos que envolvem caracterização de solos, assim como na avaliação do uso e ocupação das terras. A utilização de informações obtidas por meio de imagens orbitais é possível devido à interação dos componentes dos alvos terrestres com a energia eletromagnética refletida (Genú, 2006).

Vários pesquisadores (Ferraz et al., 2007; Luiz et al., 2001; Epiphânio e Formaggio, 1991) vêm estudando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento como uma ferramenta auxiliar na estimativa de áreas agrícolas plantadas, determinação da resposta espectral da cultura e conseqüentemente na discriminação da espécie, principalmente em base em imagens do satélite Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), que, no entanto, possui baixa resolução espectral (7 bandas).

Sensores remotos mais novos como o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), cujas imagens podem ser manipuladas e interpretadas por metodologia de imagens hiperespectrais, uma vez que as mesmas apresentam boa resolução espectral, constituídas por 14 bandas do espectro eletromagnético, podem, portanto, fornecer dados mais precisos. As imagens ASTER já têm sido utilizadas, com sucesso, em

estudos geológicos no mapeamento de minerais e minérios e da engenharia florestal e na individualização de espécies de vegetação nativa (Sousa Junior, 2005).

Na agricultura, no entanto, essa metodologia tem tido pouca aplicação, apesar do seu grande potencial para monitoramento e mapeamento da ocupação agrícola das terras, cuja demanda é cada vez mais crescente em função do grande desenvolvimento do setor no Brasil, particularmente na região Centro-Oeste. Como a utilização de dados de reflectância, obtidos por meio de espectrorradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas diversificadas, é possível o estabelecimento de metodologia para monitoramento e mapeamento dessas culturas agrícolas, além da obtenção de informações para previsão de safras de uma dada região.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer o comportamento espectral para a individualização da cultura do feijão, no Distrito Federal e no município de Cristalina, mediante uso de técnicas de sensoriamento remoto.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II. 1. A cultura do feijão

O feijão é um dos alimentos básicos de vários povos, principalmente do brasileiro, constituindo-se na principal fonte de proteína vegetal. Seu teor protéico pode chegar a 33%, com valor energético de 341 cal.100g⁻¹ (Pompeu, 1987).

O feijão-comum é uma planta anual herbácea, trepadora ou não, pertencente à família Leguminosae, subfamília Papilionoideae, gênero *Phaseolus*. Está classificado como *Phaseolus vulgaris* L., apresentando ciclo de 90 - 100 dias e um sistema radicular superficial (Inforzato et al., 1964). O feijão é cultivado em duas épocas: feijão de 1ª safra (Tabela 1), também denominado “feijão das águas”, com semeadura em outubro-novembro; e o feijão de 2ª safra (Tabela 2), também denominado como “feijão da seca” com semeadura em fevereiro-março (Conab, 2009).

Na época "das águas", o principal risco é a colheita coincidir com períodos de chuvas intermitentes, podendo causar perdas na produtividade e na qualidade do produto. Na "seca", a ausência de precipitação pluvial (chuva) durante o desenvolvimento da cultura por períodos prolongados, é o principal risco (Mapa, 2009).

O rendimento do feijoeiro é bastante afetado pela condição hídrica do solo. Deficiências ou excessos de água, nas diferentes fases do ciclo da cultura, causam redução na produtividade em diferentes proporções (Embrapa, 2003). Por isso, o cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no início da estação chuvosa é pouco explorado no Distrito Federal (DF), devido à ocorrência de pragas e doenças em função das condições climáticas reinantes no período de outubro a dezembro. Além disso, a qualidade dos grãos é prejudicada devido à quantidade de chuva que ocorre no período de colheita. A irrigação por aspersão, nos sistemas convencional, auto propelido e pivô central, tem sido o método mais utilizado na cultura do feijoeiro. Em menor escala também têm sido utilizadas a irrigação por sulcos e a subirrigação em solos de várzeas. Considerando-se o método de irrigação por aspersão, o sistema pivô central é o mais apropriado para irrigar áreas individuais maiores e, por isto, é o mais usado na cultura do feijoeiro em terras altas na região dos Cerrados, visto que a lucratividade final obtida com esta cultura depende, entre muitos fatores, do tamanho da área plantada (Embrapa, 2003).

A assim, nos últimos treze anos, o DF apresentou uma produção média de feijão de 1ª safra em torno de doze mil toneladas, contribuindo com 0,8% da produção total do Brasil. (Mapa, 2009). Já o feijão de 2ª safra teve uma produção média de mil toneladas, contribuindo com 0,07% da produção total do Brasil (1.414,9 mil toneladas) (Conab, 2009).

Tabela 1. Calendário de plantio e colheita do feijão de 1ª safra nas regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste do Brasil.

Feijão		2007						2008							
1ª safra		AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET
Centro - Sul	Plantio		P	P	P										
	Colheita					C	C	C	C						
NNE	Plantio				P	P	P								
	Colheita								C	C	C	C			

Onde: P: Plantio; C: Colheita; NNE: Região Norte – Nordeste.

Fonte: Conab (2009).

Tabela 2. Calendário de plantio e colheita do feijão de 2ª safra nas regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste do Brasil.

Feijão		2007						2008							
2ª safra		AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET
Centro - Sul	Plantio						P	P							
	Colheita								C	C					
NNE	Plantio						P	P							
	Colheita								C	C					

Onde: P: Plantio; C: Colheita.

Fonte: Conab (2009).

O zoneamento agrícola de risco climático para o Distrito Federal contempla como aptos ao cultivo do feijão de 1ª e 2ª safras, os solos considerados dos tipos 1, 2 e 3, especificados na Instrução Normativa nº 10, de 14 de junho de 2005, publicada no DOU de 16 de junho de 2005, Seção 1, página 12, alterada para Instrução Normativa nº. 12, mediante retificação publicada no DOU de 17 de junho de 2005, Seção 1, página 6, que apresentam as seguintes características:

Tipo 1: solos com teor de argila maior que 10% e menor ou igual a 15%, com profundidade igual ou superior a 50 cm; ou teor de argila entre 15 e 35% e com menos de 70% areia, que apresentam diferença de textura ao longo dos primeiros 50 cm de solo, e com profundidade igual ou superior a 50 cm.

Tipo 2: solos com teor de argila entre 15 e 35% e menos de 70% areia, com profundidade igual ou superior a 50 cm; e

Tipo 3: a) solos com teor de argila maior que 35%, com profundidade igual ou superior a 50 cm; e b) solos com menos de 35% de argila e menos de 15% de areia (textura siltosa), com profundidade igual ou superior a 50 cm.

As áreas/solos não indicados para o plantio são: áreas de preservação obrigatória, de acordo com a Lei 4.771 do Código Florestal; solos que apresentem teor de argila inferior a 10% nos primeiros 50 cm de solo; solos que apresentem profundidade inferior a 50 cm; solos que se encontram em áreas com declividade superior a 45%; e solos muito pedregosos, isto é, solos nos quais calhaus e matacões (diâmetro superior a 2 mm) ocupam mais de 15% da massa e/ou da superfície do terreno. (Mapa, 2009).

O Brasil destaca-se como o maior produtor e consumidor de feijão, sendo responsável por cerca de 16 % da produção mundial. Este grão figura ainda entre as cinco maiores culturas do país, perdendo apenas para soja, milho, trigo e arroz. Diferentemente de outras culturas, o feijão, em sua quase totalidade, é consumido internamente, não representando uma commodity de exportação significativa (Banno, 1994).

Para a safra 2008/09, constatou-se um pequeno incremento de 0,4% (190,1 mil hectares) relativo à safra 2007/08, passando de 47,4 milhões de hectares, para 47,6 milhões. Analisando a cultura do feijão, observa-se um aumento de 8,9% ou 116,7 mil hectares no feijão de 1ª safra e 5,9% (109,2 mil hectares) no feijão de 2ª safra (Conab, 2009).

No Brasil, a área plantada de feijão, no ano de 2007/2008, foi de 3.993.000 hectares; sendo que a produção do Centro-Oeste foi de 217,40 mil toneladas, com contribuição de 26,20 mil toneladas de feijão do Distrito Federal (Conab, 2009).

Mesmo sendo o primeiro alimento na preferência popular, o feijão é a cultura tecnologicamente mais atrasada do país. São muitas as causas que levaram ao desinteresse por esta cultura, podendo-se citar: a baixa remuneração ao produtor, o elevado risco climático, a substituição de áreas cultivadas por plantios de exportação ou de produção de biomassa para biocombustível, a pesquisa científica escassa e o descaso total com que a política agrícola trata o produto (Angulo Filho et al., 2001).

Por outro lado, vários autores (Garrido et al., 1979; Azevedo, 1984; Paz et al., 1997), com a intenção de reverter a situação atual, demonstraram a viabilidade da irrigação do feijão no inverno, sendo possível obter produtividades consideradas muito superiores às tradicionais, além da estabilidade na produção.

Sabe-se também que, com o avanço da tecnologia e a necessidade de um maior controle sobre os fatores que influenciam o pleno desenvolvimento da cultura, tornou-se necessário estimar algumas de suas variáveis (qualidade da cultura, vigor, estado de florescência) relacionadas com as condições biofísicas existentes, de forma a servir como dados de entrada para os atuais modelos de crescimento e de produtividade agrícola. Assim sendo, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e particularmente a utilização de respostas espectrais, pode contribuir muito para a melhoria desse processo, ao servir como bons indicadores das condições gerais de vigor da cultura (Angulo Filho et al., 2001).

Alguns trabalhos (Gallo et al., 1985; Prince, 1991 e Moreira, 1997), atestaram que em plantas de feijão sadias e adequadamente supridas de água e nutrientes, existe uma relação linear positiva entre a quantidade de radiação fotossinteticamente absorvida pelo dossel e a produção final de fitomassa e grãos; dessa forma, as técnicas de sensoriamento remoto procuram estabelecer uma relação entre a radiação solar absorvida pelo dossel da cultura e as interações com seus atributos biofísicos (Angulo Filho et al., 2001).

Angulo Filho et al. (2001) assumiram a hipótese de que variáveis espectrais e variáveis agrônomicas guardam íntimas relações entre si e que os parâmetros espectrais podem ser utilizados, quando manipulados corretamente, como descritores das condições gerais de vigor e de desenvolvimento do feijoeiro. Já Böhmer et al. (2007) avaliaram a reflectância do feijão-vagem durante o ciclo da cultura, manejada sob sistema orgânico, no interior de um ambiente protegido com cobertura de polietileno e “mulching” preto, constatando que o valor da reflectância é de 23%; porém esse coeficiente varia em função do ciclo da cultura, da nebulosidade sobre o local e do ângulo de incidência da radiação solar sobre a superfície.

II. 2. Sensoriamento Remoto

Em princípio, o sensoriamento remoto é definido como sendo a tecnologia que permite aquisição de informações sobre objetos sem manter contato físico com eles. De acordo com Novo (2008), sensoriamento remoto é a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, entre outros, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as diversas coberturas que compõem a superfície terrestre.

Com o objetivo de estudar o ambiente terrestre, o sensoriamento remoto utiliza sensores e equipamentos para registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem a superfície terrestre (Novo, 2008), entre elas, as culturas agrícolas. Para tanto, torna-se essencial o conhecimento e a disponibilização de dados de respostas espectrais de culturas agrícolas, visando alcançar a compreensão das interações entre a energia eletromagnética solar e a matéria.

Assim, a quantidade de energia refletida por um objeto é função de três fatores: (i) a energia eletromagnética incidente, que pode ser proveniente do sol ou uma lâmpada; (ii) a quantidade de energia absorvida e (iii) a quantidade de energia transmitida (Stoner e Baumgardner, 1986). Esta relação pode ser expressa como $R = I - (A + T)$. Onde R é a reflectância em um determinado comprimento de onda (λ); I é a energia incidente; A é a energia absorvida e T é a energia transmitida. A razão entre a quantidade de radiação eletromagnética refletida (radiância) e a quantidade de radiação incidente (irradiância) sobre os alvos na superfície terrestre fornece a medida de reflectância captada por sensores, denominados radiômetros ou espectroradiômetros (Sousa Junior, 2005).

Estes sensores decompõem a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda (os espectroradiômetros diferem dos radiômetros por operarem em faixas espectrais estreitas) sendo que a intensidade relativa de energia refletida pelo objeto pode ser medida de uma maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético (Novo, 2008), fornecendo um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais (Sousa Junior, 2005).

O espectro eletromagnético é a distribuição da radiação em um contínuo, que se estende desde os raios cósmicos (curto comprimento de onda) até as ondas de corrente alternada (longo comprimento de onda) (Meneses e Madeira Netto, 2001; Sousa Junior, 2005; Meneses, 2009) (Tabela 3).

Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético.

Intervalo Espectral	Comprimento de Onda
Raios Cósmicos	$0,01 \text{ A}^0$
Raios Gama	$0,01 - 0,1 \text{ A}^0$
Raios X	$0,1 - 1,0 \text{ A}^0$
Ultravioleta	$3,0 \text{ nm} - 0,38 \text{ }\mu\text{m}$
Visível	$0,38 - 0,76 \text{ }\mu\text{m}$
Infravermelho Próximo	$0,76 - 1,2 \text{ }\mu\text{m}$
Infravermelho de Ondas Curtas	$1,2 - 3,0 \text{ }\mu\text{m}$
Infravermelho Médio	$3,0 - 5,0 \text{ }\mu\text{m}$
Infravermelho Termal	$5,0 - 1,0 \text{ mm}$
Microondas	$1,0 \text{ mm} - 100 \text{ cm}$
Rádio	$1 \text{ m} - 10 \text{ Km}$
Áudio	$10 - 100 \text{ Km}$
Corrente Alternada	$> 100 \text{ Km}$

Onde: $\text{A}^0 = 10^{-10} \text{ m}$; $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$ e $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

Fonte: Meneses, 2009.

Portillo et al. (2003) afirmaram que o sensoriamento remoto fornece um amplo conjunto de técnicas úteis para caracterizar fenômenos dinâmicos que acontecem nas áreas agrícolas. Por isso, o progresso e a validação de técnicas de análise multitemporal são importantes para conduzir conhecimentos necessários à melhor utilização do sensoriamento remoto na área estudada.

Novo (2008) destacou, ainda, que o comportamento espectral dos alvos é de fundamental importância para extrair informações a partir de dados obtidos pelo sensoriamento remoto, além da definição de novos sensores, do tipo de processamento a que devem ser submetidos os dados brutos coletados pelos sensores, ou mesmo na definição da forma de aquisição desses dados, tais como, frequência, altura do imageamento, resolução limite, entre outros. Price (1994) afirmou que uma das dificuldades em estudar as assinaturas espectrais de espécies agrícolas é, ainda, a pouca disponibilidade de exemplares de cada espécie nas bibliotecas espectrais disponíveis.

Alguns autores colocam a origem do sensoriamento remoto vinculada ao desenvolvimento dos sensores fotográficos. Esta é, por exemplo, a visão da Sociedade Americana de Fotogrametria (*American Society of Photogrametry*). O Manual sobre

Sensoriamento Remoto (American Society of Photogrametry, 1975) divide a história do sensoriamento remoto em dois períodos principais: o período de 1860 a 1960, no qual o sensoriamento remoto era baseado na utilização de fotografias aéreas e o período de 1960 até os dias atuais, caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores.

Hoje em dia, assumindo uma série de funções anteriormente atendidas pela aerofotogrametria, o sensoriamento remoto multiespectral apresenta uma série de vantagens, a saber: baixo custo por área específica; aspectos diacrônicos (alta frequência de repetitividade da tomada de imagens) e sincrônicos da captação das imagens; aspecto multiespectral das imagens; caráter digital dos dados adquiridos; e facilidade de integração com bases de dados geocodificados, cartográficos ou numéricos, por intermédio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) (Azevedo e Mangabeira, 2001).

O monitoramento da paisagem de uma dada região é fator primordial no planejamento racional de utilização das terras, devido, principalmente, à velocidade da ocupação do espaço físico e ao pouco conhecimento dos seus recursos naturais. Diante deste quadro, os produtos de sensoriamento remoto orbital têm sido importantes não só na aquisição primária de informações, como nos inventários e gerenciamento da paisagem agroflorestal em países de dimensões continentais, como o Brasil (Venturieri e Santos, 1998). Com o advento de novos sensores e com a intensificação da utilização desta tecnologia na agricultura, o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo dos recursos naturais torna-se cada vez mais importante (Demattê e Garcia, 1999). Existem diversas técnicas de classificação digital em imagens de satélite, para a finalidade de levantamentos terrestres, análise e monitoramento da paisagem agroflorestal, todas procurando extrair o máximo de informações temáticas das imagens, em um menor tempo, quando comparado aos métodos tradicionais (Venturieri e Santos, 1998).

O nível de estratificação temática a ser obtida com os produtos orbitais está diretamente relacionado com a complexidade das classes de uso das terras da região de estudo. Utilizando-se sensores de baixa resolução espacial, como as imagens do NOAA/AVHRR e MODIS (pixel ~1 km), pode-se discriminar áreas cobertas com florestas, áreas desflorestadas e/ou queimadas, e, talvez, áreas agrícolas, principalmente se os alvos adjacentes forem bem contrastantes. Imagens multitemporais do NOAA/AVHRR e MODIS, realçadas para discriminação de vegetação (técnica conhecida como índice de vegetação), são utilizadas para o acompanhamento fenológico da cobertura vegetal natural e do estágio de desenvolvimento de cultivos agrícolas extensos, compatíveis com a resolução deste tipo de sensor. Com processamento digital de imagens obtidas pelos sensores na faixa óptica de

maior resolução espacial, como Landsat/TM e ETM⁺ (pixels de 30 x 30 m a 15 x 15 m) e SPOT (*pixel* de 20 x 20 m a 10 x 10 m e até 2,5 x 2,5 m), têm-se conseguido significativos resultados na caracterização da paisagem agrícola e florestal, além da análise da dinâmica de ocupação das terras (Venturieri e Santos, 1998).

Recentes avanços na tecnologia de sensoriamento remoto vêm disponibilizando para a comunidade científica internacional uma nova geração de sensores, capazes de fornecer imagens com alta resolução espectral. A análise e a interpretação destes dados apresentam novas possibilidades e também novos desafios. Dados coletados em um grande número de bandas espectrais contêm informações mais detalhadas a respeito dos materiais a serem identificados, permitindo, teoricamente, maior acurácia no processo de classificação do que aquela obtida com a utilização de dados fornecidos por sistemas sensores mais tradicionais, com resolução espectral mais baixa, como Landsat/TM e ETM⁺ e SPOT (Zortea et al., 2005).

Os sensores mais recentes, como o ASTER com quatorze bandas distribuídas nas faixas do espectro eletromagnético visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e infravermelho termal e mais uma banda pancromática, podem fornecer dados mais precisos (Sousa Junior, 2005), em função da resolução espectral maior que permite sua utilização por meio de metodologia de processamento de imagens hiperespectrais.

O sensoriamento remoto hiperespectral envolve a utilização de sensores com um número elevado de bandas (dezenas a centenas) contíguas, cuja largura, normalmente, é da ordem de 10 nm. Existem sensores hiperespectrais para serem usados em laboratório (espectroscopia de laboratório), no campo (espectroscopia de campo) e a bordo de aeronaves ou espaçonaves (obtendo-se, comumente, a espectroscopia de imagem). Embora já existam sensores hiperespectrais para espectroscopia de imagem na região do termal, a maior parte desses sensores utiliza a faixa do espectro solar situada entre 0,4 e 2,4 μm (onde os alvos ambientais apresentam inúmeras feições de absorção) (Accioly, 2004).

As imagens de sensores remotos hiperespectrais têm sido utilizadas nos estudos da vegetação, geologia, oceanografia, águas superficiais, atmosfera, solos, entre outros. Com relação à vegetação, vários estudos apresentam a aplicação da espectroscopia de imagem na avaliação dos compostos bioquímicos (tais como: clorofila, nitrogênio, celulose e lignina), na determinação da estrutura e na determinação do teor de água das folhas. No campo da geologia, os sensores hiperespectrais se beneficiam do grande número de minerais com bandas de absorção na faixa entre 0,4 e 2,4 μm . A espectroscopia de imagem, também, tem sido utilizada na determinação de compostos (como clorofila, matéria orgânica dissolvida,

entre outros) resultantes da presença de organismos aquáticos como algas e fitoplânctos (Accioly, 2004).

Como, atualmente, as imagens digitais são as mais usadas em diversos estudos (vegetação, geologia, oceanografia), deve-se observar o tipo de sensor (resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais), a localização da cena de cobertura da área a ser estudada, sua qualidade quanto à porcentagem de nuvens e datas disponíveis (Souza et al., 2007). As imagens podem ser originárias de diferentes satélites, com características diferentes (Tabela 4).

Tabela 4. Características dos satélites e imagens orbitais comumente usadas na extração de informações terrestres.

Satélites	Características		Resolução Espacial		Temporal	Resolução		
	Altitude (Km)	Faixa de Imageamento (Km)	Pancromática (m)	Multi-espectral (m)		Radiométrica	Espectral (Bandas)	Intervalo Espectral (μm)
CBERS	778	113	20	20	26 dias	8 bits	4 multi 1 pan	B1 0,45 - 0,52 B2 0,52 - 0,59 B3 0,63 - 0,69 B4 0,77 - 0,89 Pan 0,51 - 0,73
LANDSAT 7	705	185	15	30	16 dias	8 bits	7 multi 1 pan	B1 0,45 a 0,52 B2 0,52 a 0,60 B3 0,63 a 0,69 B4 0,75 a 0,90 B5 1,55 a 1,75 B6 10,4 a 12,5 B7 2,09 a 2,35 Pan 0,52 - 0,90
ASTER	730	60	–	15,30 e 90	–	12 bits	14 multi	B1 0,52 - 0,60 B2 0,63 - 0,69 B3 0,76 - 0,86 B4 1,60 - 1,70 B5 2,14 - 2,18 B6 2,18 - 2,22 B7 2,23 - 2,28 B8 2,29 - 2,36 B9 2,36 - 2,43 B10 8,125 - 8,475 B11 8,475 - 8,825 B12 8,925 - 9,275 B13 10,25 - 10,95 B14 10,95 - 11,65

SPOT 5	822	60	2,50 – 5	10	26 dias	8 bits	4 multi 1 pan	<ul style="list-style-type: none"> B1 0,50 a 0,59 B2 0,61 a 0,68 B3 0,78 - 0,89 B4 1,58 a 1,75 Pan 0,48 - 0,71
IKONOS 2	680	13	1	4	3 dias	11 bits	4 multi 1 pan	<ul style="list-style-type: none"> B1 0.45 a 0.52 B2 0.52 a 0.60 B3 0.63 a 0.69 B4 0.76 a 0.90 Pan 0,45 - 0,90
QUICKBIRD	450	16	61 – 72	2,44 – 2,88	1 – 3,5 dias	11 bits	4 multi 1 pan	<ul style="list-style-type: none"> B1 0.45 a 0.52 B2 0.52 a 0.60 B3 0.63 a 0.69 B4 0.76 a 0.90 Pan 0,45 - 0,90
ORBVIEW 3	470	8	1	4	3 dias	11 bits	4 multi 1 pan	<ul style="list-style-type: none"> B1 0.45 a 0.52 B2 0.52 a 0.60 B3 0.63 a 0.69 B4 0.76 a 0.90 Pan 0,45 - 0,90

Onde: Multi: Multiespectral; Pan: Pancromática
 Fonte Engesat (2009).

A resolução espacial ou geométrica refere-se ao campo de visada instantânea denominada, *Instantaneous Field of View* – IFOV (Figura 1). Na superfície terrestre, a resolução espacial pode ser definida como sendo a menor área do terreno que um sistema sensor é capaz de individualizar. O valor radiométrico do IFOV é a média de valores das radiâncias dos diferentes objetos que ocorrem dentro da área no terreno, que depende da resolução do sensor. Este valor médio é gravado no pixel da imagem. A referência mais usada para resolução espacial é o tamanho do pixel. Em geral, somente objetos maiores do que a área do pixel podem ser identificados, embora isso também dependa da reflectância e contraste entre objetos próximos (Souza et al., 2007).

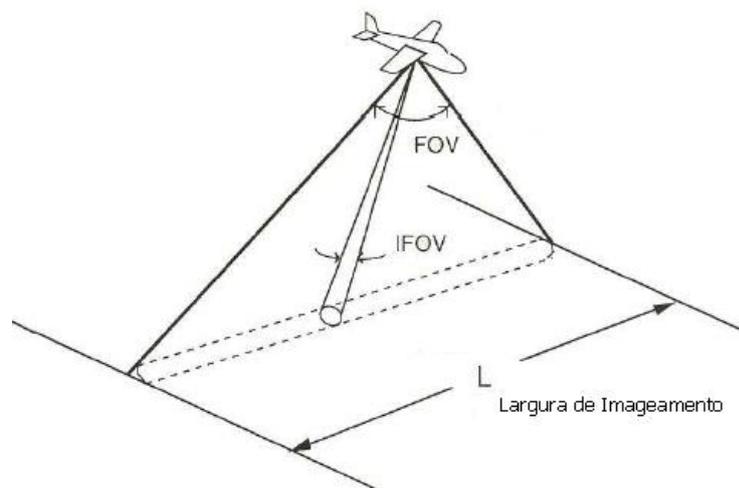


Figura 1. Identificação do campo de visada e campo de visada instantânea da imagem terrestre.

Onde: FOV: Field of View (Campo de Visada) e IFOV: Instantaneous Field of View (Campo de Visada Instantânea)

Fonte: Jars (2009)

A resolução espectral é a capacidade de discriminação dos materiais da superfície da terra e expressa a capacidade do sensor registrar a radiação em diferentes regiões do espectro. Portanto, quanto maior o número de canais espectrais, maior a capacidade discriminatória. A resolução espectral tem a ver com o número e a espessura dos canais espectrais e é definida como a habilidade de separar alvos espectralmente semelhantes (Souza et al., 2007).

A resolução radiométrica corresponde à radiação eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre, portanto, possuem valores de intensidade que diferem de um alvo para outro. Estes valores representam uma média extraída da quantificação da reflectância recebida em uma porção da superfície terrestre. A distribuição de valores, em meio digital, está associada ao número de dígitos binários (bits) necessários

para armazenar o valor máximo de cada *pixel*. Assim, podem ser obtidas imagens com resolução radiométrica de 8 bits ou 11 bits, por exemplo. Portanto, uma resolução radiométrica maior possibilitará maior contraste e melhor individualização de detalhes da superfície terrestre. A resolução radiométrica implica diretamente no tamanho dos arquivos da imagem. Uma imagem de 8 bits pode ter até 256 tons de cinza ($2^8 = 256$), enquanto que uma imagem de 11 bits pode ter até 2048 tons de cinza ($2^{11} = 2048$) (Souza et al., 2007).

A resolução temporal refere-se à frequência com que o sensor imageia uma determinada área. É também referida como periodicidade ou repetitividade. A resolução temporal do Landsat/TM é de 16 dias, enquanto a resolução temporal do SPOT é de 26 dias (Souza et al., 2007).

II. 3. Sensor ASTER

Novos sistemas sensores e satélites de observação vêm sendo desenvolvidos e lançados em órbita ao longo da Terra. Em 1999, foi lançado o satélite TERRA, como parte do programa *Earth Observation System* (EOS), em uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o governo japonês. A bordo deste satélite estão os sensores ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MISR (*Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*) (Nasa, 2009).

As imagens do sensor ASTER têm sido empregadas para o mapeamento do uso e cobertura da terra (Zhu e Blumberg, 2002; Francelino et al., 2003). Dentre as características deste sensor que o diferenciam dos tradicionalmente empregados para tal fim, tem-se a resolução espacial de 15 metros nas bandas do visível e infra-vermelho próximo e a presença de seis bandas na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) com resolução espacial de 30 metros (Tabela 5). Esse sensor encontra-se em órbita a uma altitude de 705 km, a bordo do satélite TERRA e as cenas obtidas cobrem uma área de 60 x 60 km (Engesat, 2009).

As imagens do sensor ASTER são utilizadas principalmente no monitoramento ambiental e suas imagens apresentam aplicações em relação ao uso e ocupação da terra. Entre os diversos trabalhos pode-se citar Mendonza Rojas (2004) que estudou o processo de uso e ocupação nas áreas de floresta tropical na região norte do Estado do Mato Grosso por meio de dados do sensor ASTER. Este sensor possibilitou o incremento da análise devido principalmente à sua melhor resolução espacial e espectral. Já Fidalgo e Abreu (2005) e Silva et al. (2005) utilizaram imagens do sensor ASTER para desenvolver trabalhos de

levantamento e elaboração de um mapa de uso e classificação das terras em função da sua boa resolução espacial. Os trabalhos foram realizados, respectivamente, no município de MG e em uma bacia hidrográfica do RJ e ambos concluíram que a imagem de satélite permitiu atingir os objetivos propostos, ou seja, a elaboração dos mapas de uso do solo e a avaliação da área ocupada.

Tabela 5. Resolução espectral e espacial das quatorze bandas espectrais do sensor ASTER.

Banda	Resolução Espectral (comprimento de onda - μm)	Resolução Espacial (m x m)	Faixa do espectro eletromagnético
1 (visível)	0,52 - 0,60		Verde
2 (visível)	0,63 - 0,69	15	Vermelho
3 (VNIR)	0,76 - 0,86		Infravermelho Próximo
4 (SWIR)	1,60 - 1,70		Infrav. de Ondas Curtas
5 (SWIR)	2,14 - 2,18		Infrav. de Ondas Curtas
6 (SWIR)	2,18 - 2,22	30	Infrav. de Ondas Curtas
7 (SWIR)	2,23 - 2,28		Infrav. de Ondas Curtas
8 (SWIR)	2,29 - 2,36		Infrav. de Ondas Curtas
9 (SWIR)	2,36 - 2,43		Infrav. de Ondas Curtas
10 (TIR)	8,125 - 8,475		Infravermelho Termal
11 (TIR)	8,475 - 8,825		Infravermelho Termal
12 (TIR)	8,925 - 9,275	90	Infravermelho Termal
13 (TIR)	10,25 - 10,95		Infravermelho Termal
14 (TIR)	10,95 - 11,65		Infravermelho Termal

Onde: VNIR: Faixa do Infravermelho Próximo; SWIR: Faixa do Infravermelho de Ondas Curtas e TIR: Faixa do Infravermelho Termal.

Fonte: Nasa (2009).

O conhecimento das relações entre a energia eletromagnética e as culturas agrícolas, aliado às técnicas de sensoriamento remoto, permite múltiplas utilizações dessa metodologia em estudos relacionados à agricultura. Normalmente, o que se usa é a banda simples, ou seja, o registro das informações em uma determinada banda espectral. A disponibilidade de várias bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, de acordo com os modos de operação dos vários sistemas sensores. Quanto maior o número de bandas espectrais dispuser um em um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações dos alvos terrestres ele fornece (Mather, 1999).

O sensor ASTER representa o primeiro sensor orbital multiespectral termal e seu imageamento pode ocorrer tanto no período diurno quanto noturno. Comparado ao sensor TM do Landsat 5, ele apresenta a vantagem da melhor resolução espacial, maior resolução

espectral (14 bandas espectrais) e maior resolução radiométrica, que permite maior individualização dos alvos, pois o sinal é quantizado em 12 bits, enquanto que os dados do sensor TM apresentam 8 bits em todas as suas 7 bandas espectrais. Além disso, os dados do sensor ASTER podem ser utilizados em estudos topográficos a partir da geração de modelos digitais de elevação com resolução de 15 m ou inferior (Fuckner, 2007).

Uma comparação entre os sensores ASTER e TM/Landsat (Figura 2) mostra vantagens do sensor ASTER, tais como a maior quantidade de canais na faixa do infravermelho médio (SWIR), quatro a mais que o sensor *Thematic Mapper* – TM do Landsat, além de uma melhor resolução espacial nos canais do visível e do infravermelho próximo, 15 m, enquanto os correspondentes do TM têm 30 m. A principal desvantagem do sensor ASTER está na falta de uma banda localizada na região do espectro visível de menor comprimento de onda, correspondente ao azul (Fuckner, 2007).

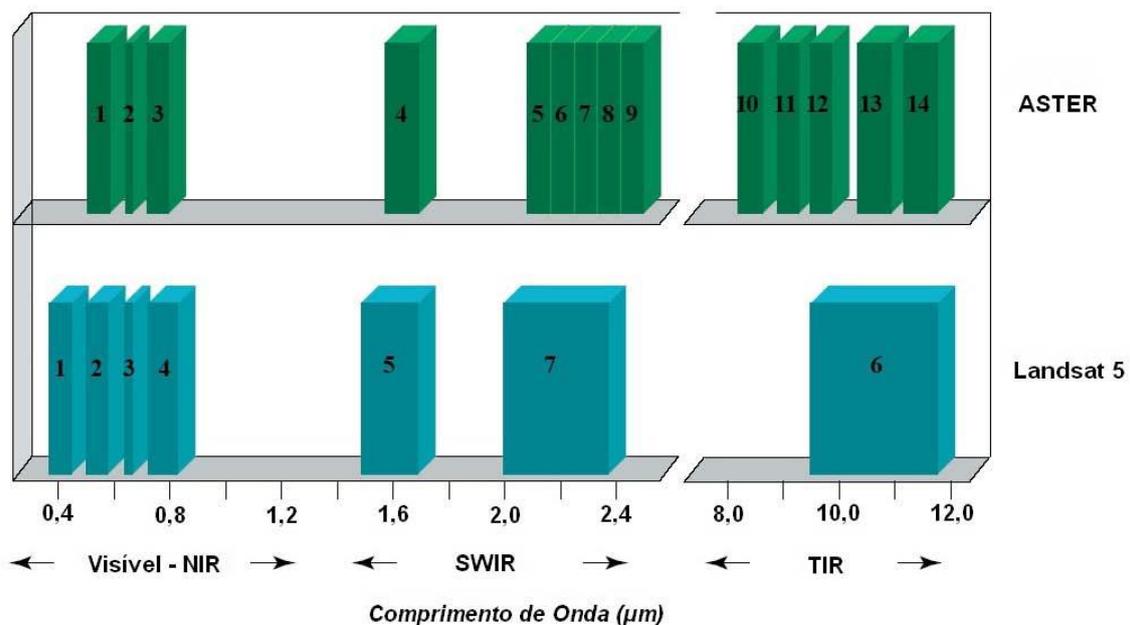


Figura 2. Comparação entre canais espectrais dos sensores ASTER e TM.

Nascimento et al. (2006) avaliaram a capacidade das imagens do sensor ASTER em identificar diferentes níveis de degradação de pastagens nos solos da Zona da Mata de Minas Gerais. Da área avaliada, aproximadamente 70% correspondem a pastagens, sendo 56,46% classificadas como fortemente degradadas; 28,73% representam mata/capoeira e 1,54% são ocupados por plantação de café. As imagens do sensor ASTER apresentaram um potencial satisfatório para separar os diferentes níveis de degradação de pastagens.

Barbosa et al. (2008) também utilizaram imagens do sensor ASTER, submetidas a processamento hiperespectral, para avaliar a distribuição da vegetação nativa e a associação com classes de solo no Distrito Federal. Foram realizados processamentos digitais de imagens denominados de razão entre bandas espectrais, como a razão banda3/banda2, para realçar o efeito foliar das clorofilas a e b, a razão banda3/banda1, com o intuito de realçar os pigmentos marrons (melanoproteínas), carotenóides e clorofila b nas folhas. As classes geradas foram: mata ciliar; associação de cerrado denso e cerrado; associação de cerrado ralo e campo sujo e associação de campo limpo e solo exposto. Estas vegetações nativas foram associadas em função das respostas espectrais semelhantes e correlação com classes de solos. A individualização dos domínios de vegetação nativa pelos mapas gerados correspondentes à razão banda3/banda2 e banda3/banda1 foi considerada eficiente, assim como a correlação com as classes de vegetação nativa estabelecidas. Os autores concluíram que a utilização de imagens do sensor ASTER com processamento digital hiperespectral é bastante eficiente na distinção de vegetação nativa e pode ser utilizada em auxílio aos mapeamentos pedológicos, subsidiando trabalhos de pesquisa em diversas áreas do conhecimento, visando, principalmente a adequada utilização dos recursos naturais objetivando a sustentabilidade dos ecossistemas.

Wagner (2004) motivou-se a utilizar imagens de um satélite multiespectral (Terra/sensor ASTER), devido à existência de dificuldades em mapeamento de espécies vegetais com respostas espectrais semelhantes e classes de alvos com pequena distribuição espacial. O foco do projeto foi a utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento para determinação de áreas de vegetação e uso do solo no extremo leste dos Campos de Cima da Serra do Estado do Rio Grande do Sul. Verificou-se que as técnicas de sensoriamento remoto são extremamente úteis para análise ambiental, especificamente para constatação mais rápida e eficaz no mapeamento da cobertura do solo, e com o sensor ASTER foi possível realizar o levantamento ambiental de forma eficaz, com alta precisão e acurácia.

Silva e Ducati (2001) demonstraram a viabilidade de identificar vinhedos em imagens de satélite entre outros tipos de vegetação. Entretanto a distinção entre variedades de uva, ainda é investigada. Tal estudo foi conduzido utilizando imagens de satélite multiespectral de dois diferentes terrois no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Informações espectrais de 13 variedades de uva (Cabernet Sauvignon, Merlot, Semillon e outras) foram extraídas de imagens coletadas pelo sensor ASTER. Medidas radiométricas em campo foram realizadas, provendo informações espectrais adicionais. Os resultados indicam fortemente que os dados ASTER contribuem de forma consistente para classificação e análise espectral de videiras, em

função da melhor (15m) resolução espacial no visível e no infravermelho e, também, resultado da introdução de bandas adicionais no infravermelho que trazem um ganho (mesmo que pequeno), na resolução espectral, crucial em estudos de vegetação.

II. 4. Processamento digital de imagens de satélite - PDI

As tecnologias computacionais possibilitaram o desenvolvimento das técnicas de análise de dados multidimensionais de diversos tipos de sensores imageadores. Tais técnicas são denominadas de processamento digital de imagens (PDI), que é a manipulação das imagens em formato digital, de forma que a entrada e a saída do processo sejam imagens. Contudo, em se tratando de reconhecimento de padrões, a entrada do processo é uma imagem e a saída corresponde a uma classificação ou qualquer outro produto gerado por processamento digital. Neste sentido, busca-se por meio do PDI, melhorar o aspecto visual de certas feições obtidas, fornecer subsídios para sua interpretação e ainda gerar produtos que possam ser submetidos a outros processamentos (INPE/DPI, 2005).

Segundo Crosta (1992), as técnicas de processamento evoluíram de forma rápida em tempos mais recentes, em função dos avanços dos sistemas de computação digital. A explosão tecnológica dos processadores digitais, juntamente com uma acentuada queda nos custos envolvidos, ocorreu na década de 80, causando fortes impactos na computação gráfica, que é à base do PDI. Com isso, uma maior comunidade de usuários passou a ter acesso aos sistemas de processamento de imagens de sensoriamento remoto, sendo comum encontrá-los, atualmente, nas universidades, escolas e em instituições públicas e privadas.

O processamento de imagens tem sido aplicado em diversas áreas do conhecimento que utilizam os produtos derivados do sensoriamento remoto. Além das investigações da superfície terrestre, tais como medicina, cartografia, indústria, manufatura, impressão, publicações, cosméticos e vestuário, assim como em vários campos de pesquisa científica, englobando astronomia, análise mineral, mecânica dos fluidos, análise radioativa, física de partículas e modelagem oceânica (Almeida, 2000).

Conforme relatado por Moreira (2003), os novos procedimentos computacionais para análise de dados coletados por sistemas sensores foram criados para agilizar as tarefas manuais de interpretação visual (delimitação de áreas, confecção de mapas, cálculo de área, entre outros) e ainda possibilitar ao analista a obtenção de padrões espectrais existentes nas imagens, facilitando a identificação dos alvos em estudo.

Rosa (2003) definiu como imagem digital, a representação numérica quantificada a partir dos valores de radiância de cada pixel da mesma. Ressaltou, também, que essa forma de

representação numérica das imagens possibilita a aplicação das várias técnicas e análises de processamentos de imagens de satélite por computadores.

Conforme Batista e Dias (2005), os sistemas computacionais contribuem na análise das imagens e na identificação das diferenças de reflectância e, com isso, possibilita o reconhecimento das feições terrestres. Neste sentido, programas computacionais apropriados facilitam a identificação e análise de regiões extensas e complexas, em relação à distribuição dos seus recursos naturais.

Pachêco e Ribas (1998) enfatizaram que o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto trata das técnicas para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse de acordo com determinado objetivo, a partir de uma grande quantidade de dados multiespectrais que compõem as imagens. O PDI é entendido como a análise e a manipulação de imagens por computador, cuja finalidade é identificar e extrair informações da imagem e transformá-la de tal modo que a informação seja mais facilmente discernível pelos analistas (Crósta, 1992).

O grande volume de dados coletados por satélites que observam os recursos naturais da Terra, em conjunto com o desenvolvimento da informática, tem estimulado o aparecimento de muitas técnicas de PDI orbitais (Richards, 1995; Schowengerdt, 1997).

Pelo fato de existirem diversas técnicas de PDI, Novo (2008) classificou estas técnicas em três conjuntos: as técnicas de pré-processamento, que se referem ao conjunto de programas que corrigem radiométricamente e geometricamente os dados digitais brutos; as técnicas de realce, que melhoram a qualidade visual da imagem para a posterior interpretação visual da cena; e as técnicas de classificação que visam o reconhecimento de objetos da cena mediante a análise quantitativa dos níveis de cinza.

As técnicas de realce das imagens têm por objetivo modificar, por intermédio de funções matemáticas, os níveis de cinza ou os valores digitais de uma imagem, de modo a destacar certas informações espectrais e melhorar a qualidade visual da imagem, facilitando a análise posterior pelo fotointérprete. As principais e mais usuais técnicas de realce de imagens são: a ampliação de contraste e composição colorida (RGB) de bandas espectrais (Rosa, 2003).

Entre as técnicas de classificação de imagens de satélite, tem-se o método de classificação não supervisionado, que realiza uma busca automática de grupos de valores radiométricos homogêneos na imagem; enquanto que numa fase posterior o usuário realiza o trabalho de encontrar as correspondências entre esses grupos e as categorias de interesse (Chuvieco, 1990; Richards, 1995). Já o método de classificação supervisionada baseia-se na

disponibilidade prévia de amostras representativas extraídas na imagem, para cada classe temática de interesse (Mather, 1999).

A classificação supervisionada pelo método estatístico da Máxima Verossimilhança considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais (que correspondem às tonalidades de cinza) das amostras correspondentes às classes temáticas, utilizando parâmetros estatísticos. Para que a classificação por máxima verossimilhança seja precisa o suficiente, é necessário um número razoavelmente elevado de *pixels*, para cada conjunto de amostras, denominado de conjunto de treinamento (maior que 30). Os conjuntos de treinamento definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe de treinamento (Markoski, 2006).

O uso de imagens multiespectrais obtidas por satélites de média resolução espectral é uma valiosa técnica para a extração dos dados destinados às várias aplicações de pesquisa de recursos naturais. A obtenção das informações espectrais registradas pelos sistemas sensores nas diferentes partes do espectro eletromagnético, visando à identificação e discriminação dos alvos de interesse, depende principalmente da qualidade da representação dos dados contidos nas imagens. As técnicas de PDI, além de permitirem analisar uma cena nas várias regiões do espectro eletromagnético, também possibilitam a integração de vários tipos de dados, devidamente georreferenciados (Silva, 2007).

II. 5. Sensoriamento hiperespectral

A alta resolução espectral dos sensores imageadores denominados hiperespectrais tornou possível a identificação mais precisa dos espectros associados aos diversos materiais presentes nas cenas imageadas, propiciando assim o desenvolvimento de inúmeras aplicações em sensoriamento remoto (Pizarro e Fernandes, 2007).

O processo de aquisição de imagens hiperespectrais, que consiste na obtenção de respostas espectrais em centenas de bandas contíguas do espectro eletromagnético, de forma a possibilitar que para cada pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa de determinado alvo. Essa técnica recebe as denominações de “espectroscopia de imageamento” e “sensoriamento hiperespectral” (Van der Meer, 1999). O objetivo da espectroscopia de imageamento é medir quantitativamente a assinatura espectral dos componentes terrestres a partir de espectros calibrados, adquiridos na forma de imagens, para uso na investigação científica e em aplicações de sensoriamento remoto (Goetz et al., 1985).

Como a maioria dos materiais terrestres pode ser caracterizada por feições de absorção espectral compreendidas na faixa do espectro eletromagnético entre 0,02 e 0,04 μm , as curvas espectrais correspondentes podem ser extraídas das imagens hiperespectrais e comparados com espectros medidos em campo ou em laboratório (Ducarti, 2004).

Segundo Ducarti (2004), existem atualmente em funcionamento vários sensores deste tipo, os quais, em sua maioria, são sensores aero-transportados, portanto, com escassa cobertura global e custos associados muito elevados. Atualmente, há apenas dois sensores hiperespectrais do tipo orbital em operação: *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS – a bordo do satélite Proba) e *Hyperion Imaging Spectrometer* (a bordo do satélite EO-1).

O sensor CHRIS cobre a faixa do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR), o que limita seu uso em vegetação e o sensor Hyperion continua sendo, o mais indicado para mapeamento da vegetação, devido à cobertura de faixa espectral entre o VIS e o SWIR (0,4 a 2,5 μm – infravermelho de ondas curtas). Entretanto, é preciso destacar que suas imagens possuem cobertura geográfica extremamente reduzida (7,5 km de largura ao longo da órbita da plataforma EO-1), além do elevado custo para a aquisição destas imagens (Markoski, 2006).

Baptista (2001) determinou a potencialidade das imagens hiperespectrais AVIRIS, obtidas no ano de 1995 na região dos Cerrados, para a espacialização e quantificação de características espectrais de alguns componentes mineralógicos de manchas de solos imageadas por meio dos dados disponíveis; e mostrou ser possível mapear e quantificar a relação mineralógica caulinita/(caulinita+gibbsita) para os solos estudados, com um elevado detalhamento.

As técnicas utilizadas no processamento de imagens de espectroscopia de imageamento, também denominado de processamento hiperespectral, possuem diferenças com relação às técnicas utilizadas com imagens multiespectrais, notadamente quanto ao seu caráter eminentemente quantitativo (Rubim, 1991; Crosta et al., 2002; Kruse et al., 1999). Contudo, estas técnicas, também, podem mostrar resultados satisfatórios quando aplicadas a imagens multiespectrais do TM/Landsat (Almeida, 2000; Swalf, 2000; Calle, 2000) e ASTER (Azcurra et al., 2003; Godoy et al., 2003. Marquetti et al., 2003; Rowan e Mars, 2003; Souza Filho et al., 2003; Markoski e Rolim, 2006). Costa Filho et al. (2007) identificaram as principais fisionomias do Cerrado de uma bacia do Rio Indaiá (MG) por meio da análise hiperespectral em imagem ASTER.

De acordo com Alixandrini (2004), dados hiperespectrais tem sido usados para mapear os materiais da superfície terrestre há mais de 15 anos. Desde a descoberta de que os vegetais extraem da radiação eletromagnética emitida pelo sol parte da energia que necessitam para viver, a interação entre essa radiação e a vegetação passou a ser estudada detalhadamente (Meneses e Madeira Netto, 2001).

Alguns estudos avaliaram o uso de dados hiperespectrais para a discriminação de alvos agrícolas, tais como Tisot et al. (2005) e Galvão et al. (2005). Ambos obtiveram bons resultados para a diferenciação de alvos mesmo com diferenças espectrais tênues utilizando dados do sensor hiperespectral Hyperion. Segundo Galvão et al. (2005), usando valores de reflectância das bandas do sensor Hyperion, razões de reflectância e índices espectrais potencialmente sensíveis a discriminação de variedades de cana-de-açúcar pôde ser feita. Neste estudo, os autores defenderam a idéia de que, visando diferenciar as variedades com maior similaridade espectral, podem ser aplicados índices espectrais e razões de bandas que caracterizaram o comportamento espectral de cada variedade nos diferentes comprimentos de onda (Schramm e Vibrans, 2007).

II. 5. 1. Spectral Angle Mapper - SAM

Segundo Adams et al. (1986) e Smith e Adams (1985) existe uma necessidade de exatidão taxonômica dos diversos tipos vegetacionais, que pode ser alcançada por meio de classificação espectral denominada SAM (*Spectral Angle Mapper*). Esta técnica mede a similaridade entre os espectros da imagem de entrada com espectros de referência, tratando ambos como vetores de n dimensões, em que n é o número de bandas da imagem (Kruse et al., 1993). O ângulo existente entre os vetores indica a similaridade dos espectros, que será maior à medida que o ângulo for menor. A classificação SAM gera dois produtos: um que individualiza a imagem em classes de acordo com os espectros de referência selecionados, que é a classificação SAM e o outro produto consiste nos arquivos de regra, gerados para cada classe do SAM. Os arquivos de regra aparecem em tons de cinza, onde essas tonalidades destacam a informação referente à classe do espectro utilizada na classificação (Costa Filho et al., 2007). Essa metodologia tem gerado bons resultados quando aplicada a sensores hiperespectrais (espectrometria de imageamento) (Boardman e Kruse, 1994, Adams et al., 1989), mas, também, mediante sua adaptação a sensores multiespectrais, particularmente o sensor ASTER, principalmente em estudos geológicos (Souza Filho et al. 2003; Hubbard e Crowley 2005), sendo ainda pouco utilizado no que se refere ao mapeamento da vegetação.

Farias et al. (2007) desenvolveram um trabalho com o objetivo de coletar informações referentes ao uso das terras e seus impactos ambientais na bacia hidrográfica do Córrego do Atoleiro/DF por meio da obtenção dos *pixels* puros e a utilização do classificador SAM. Após o tratamento e o processamento das imagens ASTER, foi possível chegar ao mapa de uso das terras da área de estudo. Com o resultado cartográfico e a validação de campo foram detectadas vinte e uma curvas espectrais nas quais foram agrupadas e reduzidas para sete classes: área urbana, solo exposto, uso agrícola, área hidromórfica, campos, cerrados e florestas. A utilização da metodologia apresentou bons resultados devido ao fato da bacia ser de pequeno porte. A cidade apresenta uma heterogeneidade de espectros apresentando muitas vezes mesmas características dos alvos rurais e solo exposto por apresentar vegetação, imóveis, terrenos baldios e outros.

II. 5. 2. Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME

Em relação ao Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), Shimabukuro e Smith (1991) comentaram que este processo visa agrupar pixels na imagem em função da proporção de cada componente, como solo, vegetação e sombra (ou água), sendo que a estimativa das proporções de cada componente é realizada com base em uma amostra obtida mediante trabalho de campo ou na imagem (o analista determina os pixels puros). O princípio básico do modelo é a decomposição linear dos dados originais em componente sombra, solo e vegetação (Alvarenga et al., 2005). Como resultado, obtém-se algo semelhante a uma “classificação suave” para cada componente analisado, onde áreas claras ou mais escuras na imagem indicam, respectivamente, uma maior ou menor proporção do alvo em estudo. Pode-se dizer, então, que o MLME representa um novo conceito de análise, ao nível de subpixel, onde é possível estabelecer uma nova regra para o mapeamento, não mais em função de limites rígidos (fronteiras entre alvos distintos), mas sim considerando a proporção física do alvo ao longo de toda a área analisada (Ferreira, 2003).

Segundo Piwowar et al. (1998), apesar das resoluções espaciais dos sensores orbitais terem aumentado substancialmente nos últimos anos, a maioria dos dados ainda apresenta uma característica espectralmente misturada, já que a variação espacial dos fenômenos naturais cresce à medida que a escala aumenta. Contribuem também à mistura no sinal, principalmente entre pixels, fatores prejudiciais à obtenção das imagens, em particular aqueles originados a partir da contaminação atmosférica, da variação na geometria de aquisição dos dados pelo sensor, assim como nas diferenças de iluminação na superfície, devido aos aspectos topográficos da região (sombra).

Todos os materiais na natureza apresentam, em um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético, um comportamento espectral próprio, por exemplo, para o solo exposto, vegetação verde, seca e água (ou sombra). Em alguns casos, esta diferenciação torna-se mais difícil, principalmente pela proximidade entre os alvos e semelhança na resposta espectral. Tal fato é observado em algumas classes de Cerrado, cuja confusão espectral é mais elevada (Ferreira, 2003). Frente a este problema, o MLME visa identificar a contribuição de cada alvo presente nos pixels de uma cena, permitindo que uma imagem de satélite seja analisada de forma “suave” e precisa na escala de subpixel (Schowengerdt, 1997; Schweik e Green, 1999). O termo “suave” vem do conceito de *soft classification* (classificação suave), onde os pixels não são necessariamente identificados como pertencentes a uma determinada classe temática, mas sim pela maior ou menor proporção dos componentes analisados pelo modelo de mistura.

Este modelo fundamenta-se no pressuposto de que um espectro misturado (diferentes alvos no campo de visão do sensor), numa imagem qualquer pode ser modelado por meio de uma combinação linear de espectros puros, conhecidos por *endmembers* (Roberts et al., 1998). Os *endmembers* referem-se ao conjunto de espectros “puros” que serão utilizados em um modelo de mistura e que, quando combinados por regra apropriada, são capazes de reproduzir os demais espectros encontrados na imagem (Adams et al., 1989). Segundo Detchmendy e Pace (1972) e Aguiar et al. (1999), o modelo linear foi desenvolvido com este propósito de compreender as variações encontradas nas assinaturas espectrais de diversos materiais, o que de certa forma pode ser interpretado como uma função de proporção dos *endmembers* contidos em cada pixel da cena.

Outros objetivos do MLME referem-se à redução da dimensionalidade dos dados em uma imagem com n bandas, tornando-a apropriada para um novo processamento (ex. classificação não-supervisionada), e o realce dos alvos de interesse, ambos obtidos pela geração de Imagens Fração (Aguiar et al., 1999; Verona et al., 2001).

A imagem erro ou imagem RMSE (*Root Mean Square Error*), obtida do processamento com o MLME, tem como função principal indicar a qualidade dos *endmembers* utilizados no modelo. *Pixels* escuros indicam baixo valor de RMSE, ou seja, *pixels* modelados corretamente, enquanto que *pixels* brilhantes demonstram um valor mais alto de RMSE, provavelmente causado pelo uso de *endmembers* inapropriados ao modelo de mistura. Outros fatores contribuem para que os valores de erro sejam mais elevados, tal como a ausência de um importante *endmember* para modelar o *pixel*, na medida em que a proporção

de um determinado material não tenha sido reconhecida pelos *endmembers* inseridos numa primeira tentativa (Ferreira, 2003).

Apesar de ter seu uso vinculado às aplicações espectroradiométricas (hiperespectrais), os modelos lineares de mistura espectral vêm sendo utilizados com sucesso em imagens multiespectrais, citando-se, por exemplo, a viabilidade do método na detecção de mudanças na paisagem (ex. desmatamento) e nas pesquisas relacionadas com a mineralogia (Adams et al., 1995; Bryant, 1996).

Ferreira (2003) pesquisou a aplicação do modelo linear de mistura espectral para a discriminação das principais fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado), utilizando dados obtidos pelo sensor Landsat ETM⁺, a fim de elaborar um novo mapa de vegetação desse Parque por intermédio da definição de um conjunto apropriado de *endmembers*. Concluiu que este modelo apresentou um bom desempenho na discriminação de fitofisionomias da área (mata de galeria, campo limpo, campo sujo, cerrado, reflorestamento, solo exposto, entre outros).

O uso desses modelos tem se estendido também, com resultados bastante satisfatórios, para o monitoramento de queimadas e desmatamentos na Amazônia, como demonstrado por Cochrane e Souza (1998) e Souza e Barreto (2000). No setor agrícola, o MLME vem sendo utilizado para distinguir com maior precisão as áreas de culturas (ex. algodão) daquelas ocupadas por solo e sombra. Obtém-se, assim, uma estimativa mais confiável da área de plantio e de sua respectiva produtividade (Maas, 2000).

II. 6. Espectroradiometria

Conceitualmente, a radiometria pode ser definida como a ciência ou a técnica de quantificar a radiação eletromagnética (Lorenzetti, 2002). A extração de informações contidas em imagens, multi ou hiperespectrais, fundamenta-se no conhecimento sobre como cada objeto imageado comporta-se com relação aos fenômenos de absorção, emissão e reflexão da radiação eletromagnética (REM) interagida com tal objeto, permitindo, então, analisar os componentes e as condições dos objetos estudados (Alvarenga et al., 2003). A intensidade e os comprimentos de onda da REM refletida e absorvida pelos objetos em estudo são detectados nos espectroradiômetros terrestres e transformados em um gráficos por meio de *softwares* especializados. Pela análise desses gráficos se determinam as curvas espectrais de cada alvo em estudo.

A caracterização espectral de um alvo, também conhecida como assinatura espectral, é a representação gráfica da reflectância em faixas de comprimento de onda bem estreitas e

adjacentes. Ela representa de forma detalhada o resultado da interação da energia radiante com o objeto em estudo. As variações de amplitude na caracterização espectral são indicadoras das propriedades espectrais dos objetos (Steffen e Moraes, 1993).

A importância desta técnica de sensoriamento remoto se deve ao fato dela permitir a eliminação do efeito da atmosfera na coleta de dados, uma vez que a distância entre o sensor e o alvo é mínima. Ela permite, também, um perfeito controle dos diversos ângulos de observação, assim como do ângulo de iluminação, eliminando dessa forma, várias fontes de variação na obtenção dos dados de sensoriamento remoto. Além disso, pode-se fazer uma descrição detalhada dos alvos que estão sendo observados, o que permite a construção de uma biblioteca de informação valiosa para a interpretação de alvos detectados e avaliados por outros sistemas sensores (Batista, 2005).

A radiometria de campo é uma técnica de fundamental importância para o sensoriamento remoto, tanto ao nível de pesquisa básica como aplicações operacionais (Milton, 1987). Segundo o mesmo autor, a radiometria atua no mínimo em três áreas do sensoriamento remoto: primeiro, agindo como ligação entre as medidas de laboratório e as condições de campo, dessa forma, útil na calibração de sensores orbitais e aerotransportados; segundo, é útil na predição de bandas espectrais ótimas, configuração de visada e horário para realizar uma tarefa particular de sensoriamento remoto; terceiro, fornecer uma ferramenta para o desenvolvimento, refinamento e teste de modelos, relacionando atributos biofísicos com os dados remotamente sensoriados.

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de um maior controle sobre os fatores que influenciam o pleno desenvolvimento das culturas agrícolas, tornou-se necessário estimar algumas de suas variáveis biofísicas, para que sirvam como dados de entrada para os atuais modelos de crescimento e de produtividade agrícola. Assim sendo, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e particularmente a utilização de assinaturas espectrais das culturas agrícolas, pode contribuir para a melhoria desse processo de controle, ao servir como bons indicadores das condições gerais de vigor da cultura. A espectrorradiometria é, então, uma técnica muito importante utilizada na agricultura, pois permite obter medidas espectrais ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, sob condições mais favoráveis, em termos de influência atmosférica, do que os dados coletados por sensores remotos a bordo de satélites (Deering, 1980). Apesar da complexidade dos sistemas vegetados, têm-se procurado avaliar alguns parâmetros espectrais relacionados com as condições de desenvolvimento desses sistemas, tais como: razão simples (RS) e o índice perpendicular de vegetação (PVI); constatando haver relações de interesse agrônomo entre os parâmetros espectrais de satélite

e os parâmetros agrônomo das culturas (índice de área foliar - IAF, porcentagem de cobertura vegetal sobre o terreno - COV e a densidade de clorofila) (Epiphânio e Formaggio, 1991; Epiphânio et al., 1994). Para Ponzoni (2001), os índices de vegetação servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados para diagnosticar vários parâmetros biofísicos, com os quais apresentam altas correlações, incluindo índice de área foliar. Os índices mais comuns são aqueles provenientes de medidas da refletância de dosséis de vegetação, nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Informações espectrais da vegetação e de outros alvos podem ser obtidas em três níveis: (i) terrestre, utilizando sensores no campo ou em laboratório; (ii) aéreas, utilizando sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital, que utiliza sensores a bordo de satélites. A utilização de um sensor ou de outro, em determinado nível de coleta de informações espectrais, depende, sobretudo de fatores relacionados ao objeto da pesquisa, tamanho da área imageada, disponibilidade do equipamento, custo e precisão desejada (Ben-dor et al., 1999; Moreira, 2003). Os sensores de laboratório geralmente apresentam alta resolução espectral podendo ser muito mais detalhados dos que os colocados em órbita. Os dados de laboratório permitem compreender os princípios físicos e químicos das reflectâncias destes alvos e são os principais responsáveis pela obtenção dos padrões espectrais “puros” dos alvos, para posterior validação por sensores orbitais (Ben-dor et al., 1999).

Segundo Galvão (1994), a base de dados espectralradiométricos obtidos em laboratório torna-se mais importante quando os mesmos são utilizados para análise de imagens de satélite de alta resolução espectral, que são capazes de amostrar o espectro eletromagnético em bandas estreitas e contínuas.

Várias pesquisas têm sido realizadas com base em espectroscopia de campo. Batista et al. (1988) mediram o comportamento espectral de duas variedades de soja. Moreira (1997) analisou o comportamento do trigo e Rudorff et al. (1990) estudaram o comportamento espectral da soja no Distrito Federal. Estes autores estudaram o comportamento espectral destas culturas para obter o índice vegetativo (razão entre a energia refletida na banda do infravermelho próximo e a banda do vermelho) que visam representar as condições de crescimento e desenvolvimento da cultura. Estes índices foram relacionados com medidas agrônomicas (produtividade, biomassa verde, biomassa seca, altura média das plantas, porcentagem de cobertura do solo e o rendimento de grãos) os quais obtiveram alta correlação. Com isso as medidas espectrais podem se apresentar como um método alternativo para estimativas confiáveis de biomassa verde destas culturas.

II. 7. Características Espectrais

II. 7. 1. Características espectrais das culturas agrícolas

Para o sensoriamento remoto, a reflexão é um fenômeno importante, uma vez que normalmente é a radiação refletida pelos alvos na superfície terrestre a base das informações. Daí a associação entre o termo comportamento espectral e a reflectância espectral. O termo comportamento espectral é comumente relacionado à maneira pela qual um determinado alvo reflete a radiação proveniente de uma fonte natural ou artificial. A reflectância espectral é o parâmetro para distinguir os diferentes alvos numa imagem de satélite e está associado às características intrínsecas de composição físico-química do alvo, o que possibilita discriminar e/ou identificar os alvos das imagens (Freire e Bastos, 1998).

Estudos demonstram que em mapeamentos de vegetação utilizando sensores remotos orbitais, características típicas de regiões tropicais (rugosidade e sombreamento provenientes de grande variedade de espécies e fitofisionomias herbáceas, arbóreas e arbustivas, variações acentuadas nos tipos de solos, elevada umidade atmosférica e teores significativos de matéria orgânica) por vezes mascaram parâmetros como índices de área foliar e biomassa (Huete, 1988; Epiphânio e Vitorello, 1984). Um importante subsídio neste sentido trata-se da detecção de componentes bioquímicos (lignina, proteína, celulose), os quais podem auxiliar nas atividades de mapeamentos de vegetação. Porém, apesar de ser importantes para distinção entre diferentes fitofisionomias (Almeida, 2005), o mapeamento por meio de imagens orbitais são dificultadas, visto que algumas de suas feições diagnósticas são bloqueadas pelas bandas de absorção do vapor d'água presentes na atmosfera (Curran et al., 2001; Kokaly e Clark 1999).

Em culturas agrícolas de ciclo curto, há variação da quantidade de material vegetal contido no dossel da plantação durante o desenvolvimento fenológico. Esta variação é de máxima importância na interação da radiação eletromagnética com a cultura, pois leva as informações da cultura até os sensores remotos (Formaggio, 1989). Assim, segundo este mesmo autor, a extensão do ciclo de uma cultura pode ser subdividida, de maneira simplificada, em três fases fenologicamente distintas:

1^a) Ocorre o domínio do solo nas interações com a radiação eletromagnética – é a fase que envolve o plantio, a germinação e o desenvolvimento inicial, em que a cultura recobre pouca porcentagem da superfície do solo;

2^a) Ocorre o domínio da cobertura verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética – neste ponto já se pode considerar formada a lavoura; e na segunda metade desta fase já ocorre o florescimento e a formação dos grãos; e

3ª) Sobrevêm a maturação e a senescência – ocorre o secamento e a queda acentuada das folhas, voltando a expor grande porcentagem do solo e, assim, ocorre o domínio conjugado da vegetação seca e do solo exposto.

Cada cultura tem características fenológicas próprias no decorrer do seu ciclo biológico, seja em função de sua dinâmica de desenvolvimento, seja em relação a parâmetros da arquitetura das plantas, ou ainda com referência aos aspectos de tratos culturais adotados (Ferri, 2002).

Os solos, a estrutura do dossel (densidade de plantio, arquitetura das plantas, entre outros) e aspectos de geometria de iluminação e de visada da cena pelo sensor orbital, têm sido alguns dos fatores citados como principais influenciadores na resposta espectral dos dosséis vegetais (Jackson e Pinter, 1986; Jackson et al., 1990 e Formaggio et al., 1995).

II. 7. 2. Características espectrais das folhas

Diversos autores têm buscado o conhecimento das propriedades espectrais de folhas pelo fato de serem estes órgãos os principais responsáveis pelo comportamento espectral do dossel, devido à grande área exposta à radiação incidente e, também, devido às suas propriedades de reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética incidente (Ferri, 2002).

Assim, as diferenças de refletividade que permitem a discriminação de espécies de plantas e de tipos de vegetação podem ser baseadas nas características de suas folhas e do dossel. As folhas de uma dada espécie tendem a ter algumas características próprias, como superfície, espessura (Gausman, 1985a), conteúdo de pigmentos e estrutura interna (Gates et al., 1965), que são função das diferenças morfo-fisiológicas entre as espécies e estes fatores dependem do tipo de folha, estágio de maturação e senescência (Gausman, 1985a). Todos esses fatores influenciam nas propriedades espectrais das folhas, aumentando ou diminuindo a sua reflectância e os padrões de reflectância ou resposta espectral registrados pelos sensores remotos, que representam a integração destes efeitos (Knipling, 1970).

Em uma vegetação verde, na região do espectro eletromagnética da luz vermelha (0,63– 0,67 μm), a REM é absorvida pela clorofila, com pouca transmissão e pouca reflexão, ao passo que no infravermelho próximo (0,7 – 1,3 μm) a absorção é quase zero, já a reflectância e a transmitância são altas (Knipling, 1970), devido à estrutura interna das folhas, como frisaram vários autores (Figura 3) (Gates et al., 1965; Bauer et al., 1980; Gausman, 1985b).

Desta maneira, à medida que aumenta a quantidade de vegetação, a reflexão na banda espectral do infravermelho próximo (IV) aumenta e a reflexão na banda do vermelho (V) diminui, fazendo com que o aumento da razão entre as bandas IV/V seja potencializado, realçando a vegetação. Quando várias camadas de folhas vão sendo sobrepostas num dossel em desenvolvimento, concomitantemente vão ocorrendo aumentos nos níveis de reflectância nas porções espectrais do IV (Epiphânio e Formaggio, 1991).

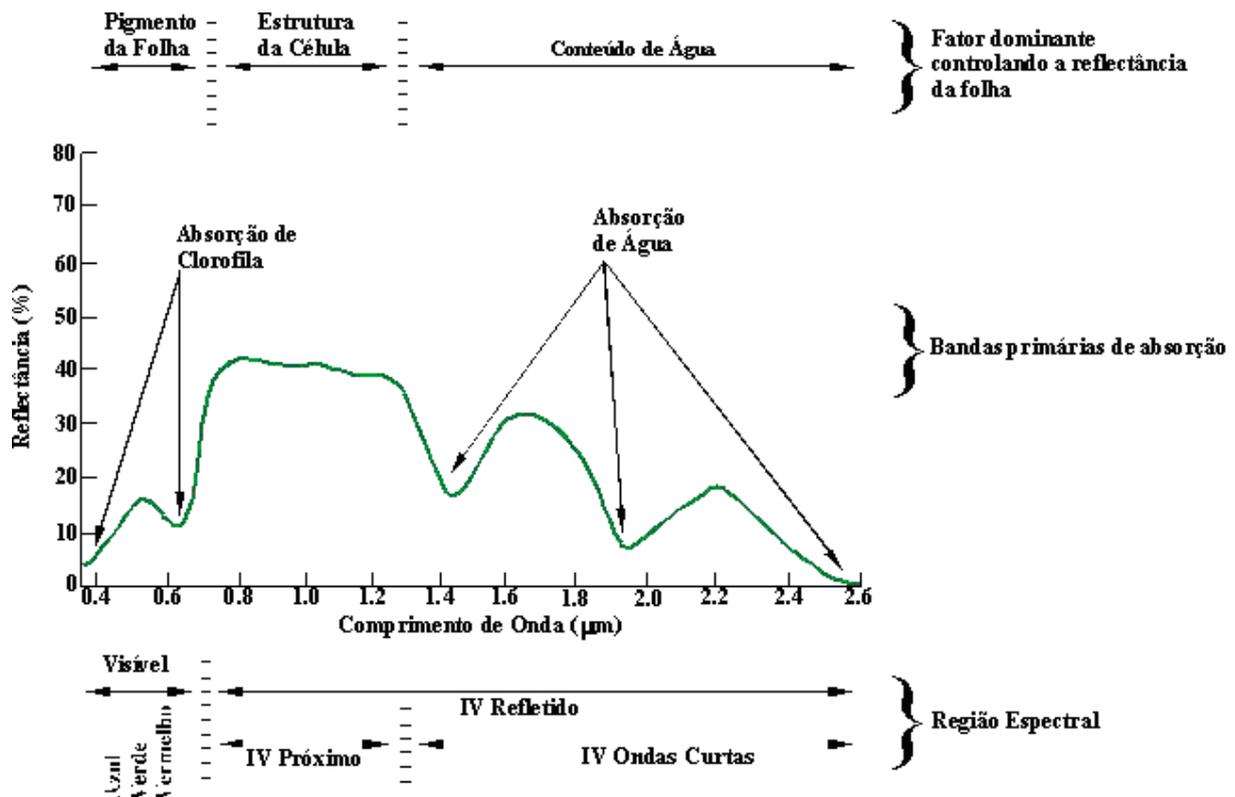


Figura 3. Resposta espectral da vegetação com folhas verdes.

Na região do visível (0,4 a 0,7 µm), os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos existentes nas folhas podem variar grandemente de espécie para espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência e, também, convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos por intermédio da fotossíntese (Castro Junior, 2001).

Já na região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 µm) existe uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa

nessa região e a reflectância espectral é quase constante. Gates et al. (1965) determinaram que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância (Castro Junior, 2001).

A absorção devido à água líquida predomina na reflectância espectral das folhas na região do infravermelho de ondas curtas (1,3 μm a 2,6 μm). Considerando a água líquida, esta apresenta na região em torno de 2,0 μm , uma reflectância geralmente pequena, sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de 65° e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20°. A água absorve consideravelmente a REM incidente na região espectral compreendida entre 1,3 μm a 2,0 μm . Em termos mais pontuais, a absorção da água se dá em 1,1 μm ; 1,45 μm ; 1,95 μm ; 2,7 μm e 6,3 μm (Castro Junior, 2001).

As feições de absorção provenientes de proteínas, ligninas e celulose aparecem apenas no espectro de folhas secas, devido à redução das feições de absorção da água que mascaram essas feições em folhas verdes (Jacquemoud e Baret, 1990; Jacquemoud et al., 1996; Kokaly et al., 1998). Desta forma, a assinatura espectral das folhas verdes e saudáveis na região do visível é dominada pelos pigmentos (clorofilas e carotenóides) enquanto que, no infravermelho de ondas curtas é dominada pela água. Quando a folha entra em processo de senescência ou stress, apresentando redução no teor de clorofilas, a intensidade das bandas de absorção no intervalo entre 0,45 e 0,65 μm reduz e ocorre um aumento simultâneo da reflectância. Essas modificações não são devidas apenas a redução das feições de absorção da água, mas também às alterações estruturais que ocorrem na folha quando esta perde umidade (Carvalho Junior et al., 2005).

II. 7. 3. Características espectrais dos solos

Os solos têm uma ampla ocorrência na superfície terrestre e contribuem significativamente para o sinal eletromagnético refletido pela maioria dos alvos naturais terrestres. Assim, parte das pesquisas em sensoriamento remoto tem sido direcionada ao entendimento e ao desenvolvimento de métodos para a análise da influência das características dos solos na resposta espectral dos alvos em geral (Formaggio et al., 1996).

A reflectância do solo é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral dos constituintes minerais, orgânicos e fluidos que, combinados, compõem os solos.

As variações espectrais entre os diferentes tipos de solos estão normalmente associadas aos processos de absorção da REM atribuída a esses componentes. Considerando todos estes fatores, torna-se possível, então, avaliar a importância do comportamento espectral dos solos no estudo de alvos agrícolas, utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto (Formaggio et al., 1996).

O sensoriamento remoto pode ser utilizado como uma técnica auxiliar no estudo de solos. Trabalhos vêm sendo realizados para entender as relações entre os atributos dos solos e sua energia refletida, que nada mais é do que a expressão das diferentes características dos solos. O comportamento espectral dos solos varia de acordo com diversos fatores intrínsecos a eles. Os atributos que mais influenciam a energia refletida são: conteúdo e tipo de matéria orgânica e óxidos de ferro, minerais argilosos, textura e umidade (Bowers e Hanks, 1965; Baumgardner et al., 1970; Al-Abbas et al., 1972; Mathews et al., 1973; Sherman e Waite, 1985; Coleman e Montgomery, 1987).

A cor é uma propriedade largamente utilizada para classificar e fazer interpretações sobre os solos. Os teores de matéria orgânica e óxidos de ferro estão intimamente relacionados a tal propriedade. O Sistema Brasileiro de Classificação (Embrapa, 2006) utiliza os limites de matiz de cor para diferenciar classes de solos, além disso, a matiz é a gama de cor do espectro solar, que traduz o comprimento de onda dominante da luz refletida por determinado corpo (Sousa Junior, 2005). Segundo Sousa Junior (2005), os solos com matiz mais vermelhas (2,5YR – 10R) apresentam uma menor intensidade de energia refletida, no horizonte A, tendo um fator de reflectância de até 20%. Já os solos com matizes mais amarelas (10YR – 7,4YR) apresentam uma maior intensidade de reflectância, no horizonte A, atingindo até 30% (Figura 4).

Poucos trabalhos foram realizados no sentido de entender as relações solo-reflectância em solos brasileiros. Epiphânio et al. (1992) caracterizaram vários solos do estado de São Paulo; Madeira Netto et al. (1993) estudaram as bandas de absorção da gibbsita de solos dos cerrados; Boluda et al. (1993) concluíram que solos com maiores teores de carbonato de cálcio apresentaram maior intensidade de reflectância.

Sanches et al. (2005) verificaram que quando as culturas de soja, cana-de-açúcar e milho estão em início de crescimento, a identificação das mesmas em imagens de satélite Landsat é bastante difícil, pois a resposta espectral desses alvos é muito influenciada pelo solo. Ou seja, se cultivadas sob o mesmo solo, o comportamento de diferentes culturas em imagens de satélite será bastante semelhante nas primeiras fases de desenvolvimento. O mesmo é observado após a colheita das culturas, quando o solo volta a aumentar sua

influência no comportamento espectral. À medida que as plantas crescem, diminui a influência do solo e crescem as possibilidades de diferenciação de culturas, pois aumenta a influência das características específicas de cada tipo de planta.

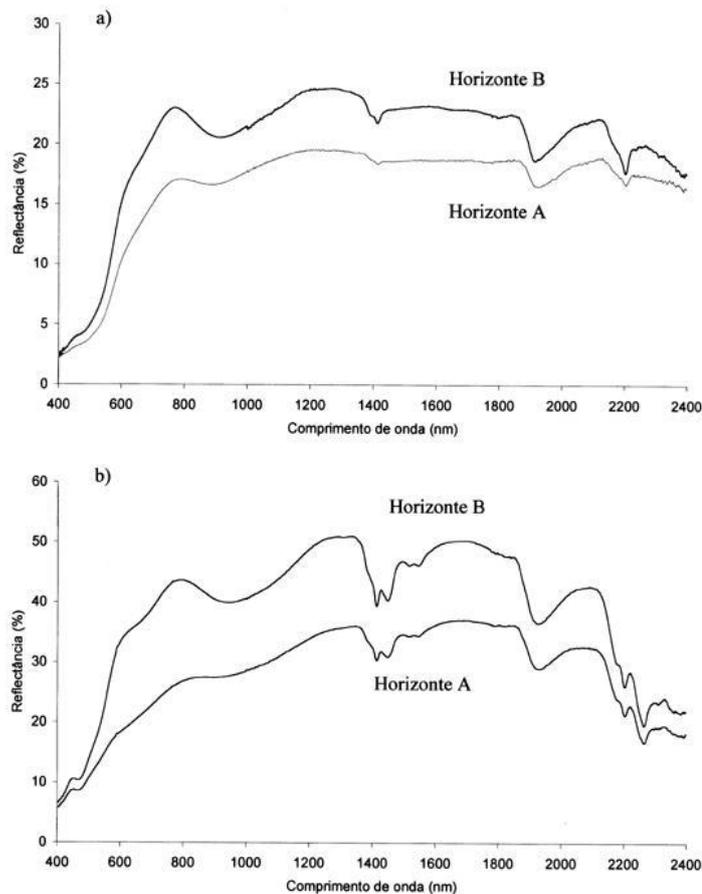


Figura 4. Curvas espectrais dos horizontes A e B de um Latossolo Vermelho distroférico típico (a) e de um Latossolo Amarelo ácrico típico (b).
Fonte: Dalmolin (2002).

II. 8. Sensoriamento remoto aplicado na elaboração de cartas de cobertura do solo

As propriedades espectrais da vegetação podem ser utilizadas para o monitoramento das condições de crescimento da vegetação ao longo do ano, assim como a estimativa da produtividade das espécies, por meio de técnicas de sensoriamento remoto (Fonseca, 2002).

A técnica da segmentação vem sendo utilizada como uma metodologia alternativa para classificação de imagens de satélite. O diferencial entre as técnicas de classificações convencionais de processamento de imagem e a técnica de segmentação é que essa última tem como premissa o agrupamento de *pixels* com características similares em termos tonais e texturais, formando regiões homogêneas, sendo estas posteriormente submetidas ao processo de classificação (Venturieri e Santos, 1998). Chaves et al. (2001) investigaram o processo de

segmentação para identificação e mapeamento dos principais tipos de pastagens cultivadas no Cerrado, encontrando características espectrais diferentes entre três espécies de forrageiras, permitindo a diferenciação destas por meio de análise de imagens do TM/ Landsat.

A cobertura do solo definida como a projeção vertical da vegetação na superfície, destaca-se como uma característica quantitativa de interesse para a avaliação das culturas agrícolas, além de ser uma das variáveis utilizadas para a definição da produtividade e determinação do estado da vegetação da cultura. O estudo e reconhecimento das técnicas mais adequadas para a avaliação quantitativa da cobertura do solo apresentam importância para a geração de modelos que relacionem os dados de campo com os valores de reflectância registrados pelos sensores remotos (Senseman et al., 1996; Zhou et al., 1998).

Para a estimativa da cobertura do solo, são utilizados vários métodos entre os que se destacam: (a) observação direta da superfície; (b) geração de “cartas da cobertura”; (c) interceptação de uma linha transecta; e (d) interceptação de pontos. O método de geração de “cartas da cobertura” é um procedimento detalhado que possibilita a representação da distribuição e da área ocupada pela vegetação em uma unidade de amostragem (Brown, 1954). As principais desvantagens desse método se encontram relacionadas ao grande esforço e tempo necessário para a geração das estimativas, associado à interpretação visual das amostras. Essas limitações podem ser levantadas com o auxílio de técnicas de processamento de imagens, que permitem realizar de uma maneira automática ou semi-automática o agrupamento em classes, dos elementos (*pixels*) com resposta espectral semelhante, isto é, vegetação em estado vegetativo (ou seca), palhada e solo.

Ippoliti et al. (2003) descreveram um método para a elaboração de “cartas da cobertura”, por meio da classificação digital de fotografias verticais em áreas de pastagens, obtendo um alto grau de concordância com a avaliação visual em termos gerais (exatidão global: 82,6%), sendo que as maiores confusões do classificador utilizado foram originadas entre as classes de vegetação seca e solo exposto.

II. 9. Sistemas de Informações Geográficas (SIG's)

Para o manuseio e análise dos dados provenientes de sensores remotos, os aplicativos mais usados atualmente são os de processamento digital de imagens e os denominados Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Estes aplicativos são capazes de armazenar, analisar e localizar espacialmente dados já analisados e tratados (Piroli et al., 2002).

O primeiro sistema a reunir as características básicas de um SIG foi implementado no Canadá, em 1964, chamado de *Canadian Geographic Information System* (Teixeira et al.,

1992). Desde então, com a evolução dos equipamentos e aplicativos te ocorrido avanços consideráveis, com o desenvolvimento de sistemas cada vez mais potentes e com muitas novas aplicações.

Os SIGs são, conforme Calijuri e Röhm (1994), uma excelente ferramenta para a investigação de fenômenos diversos, relacionados à engenharia urbana, meio ambiente, pedologia, vegetação e bacias hidrográficas. Além disso, na área ambiental, a tomada de decisão requer um conhecimento multidisciplinar. Desta forma, o geoprocessamento veio auxiliar a resolver grande parte dos problemas de tempo, mão-de-obra e da pouca precisão quando o volume de informações é grande (Pereira et al., 1995).

II. 10. Mapeamento terrestres por Sistema de Posicionamento Global GPS x Mapeamento terrestre por imagens de satélites

O GPS (*Global Positioning System*) foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, originalmente para fins militares, liberado com restrições para uso civil em 1977, e desde então vem sendo aprimorado, principalmente ao que diz respeito aos aparelhos eletrônicos e programas computacionais. O sistema GPS foi projetado para se obter o posicionamento instantâneo bem como a velocidade de um ponto na superfície da terra (Fiorio, 2007).

Os trabalhos de campo, seja para fins cartográficos ou para o levantamento e/ou monitoramento dos recursos terrestres, sempre foram uma das etapas mais dispendiosas no processo de mapeamento. A manutenção de equipes de trabalho em campo tem um custo relativamente alto. A entrada em operação comercial do sistema GPS no início da década de 90 trouxe maior agilidade os trabalhos de campo, seja na construção cartográfica, seja para o posicionamento instantâneo “in loco” de determinado alvo na superfície terrestre.

Atualmente, representa uma nova ferramenta para cartografia e ciências afins, tendo o uso do GPS crescido significativamente nas atividades agrícolas. O Brasil é um país de extensão territorial e carente em informações georreferenciadas, sendo a utilização do GPS uma ferramenta promissora nas atividades agropecuárias (Fiorio, 2007).

Os processos convencionais de transporte e determinação de coordenadas, triangulação e poligonação geodésicas, determinações astronômicas de posição, entre outros; podem ser substituídos pelos sistemas GPS. Nos GPS, o cálculo das coordenadas geográficas de um ponto baseia-se na triangulação de pelo menos três satélites em órbita, que fazem parte de uma constelação própria de vinte e quatro satélites, onde o posicionamento exato dos satélites no espaço, assim como a distância da superfície terrestre e entre eles são conhecidas

e monitoradas. Esses satélites transmitem sinais de navegação continuamente aos receptores GPS, permitindo a obtenção das coordenadas tridimensionais de um ponto (latitude, longitude e altitude) de forma mais rápida e mais precisa que os métodos convencionais. Esta ferramenta reduz o tempo de duração dos trabalhos de campo e, conseqüentemente, os seus custos. Esta redução de tempo/custo viabilizou um grande número de tarefas, até então inviáveis de serem executadas (Gorgulho, 2009).

O sistema GPS pode ser utilizado em diversas aplicações no setor agrícola, tais como: na agricultura de precisão, levantamentos topográficos e de solos, e também podem ser aplicados juntamente com o Sistema de Informações Geográficas, conseguindo assim uma maior exatidão no mapeamento terrestre por imagens de satélite (Fiorio, 2007).

A agricultura de precisão consiste em manejar as culturas de forma a conhecer as suas necessidades, que variam espacialmente no terreno. Torna-se, então, de extrema importância a obtenção de coordenadas ponto a ponto, geralmente em tempo real. Estes dados georreferenciados irão, posteriormente, alimentar bancos de dados SIG para os mais diversos estudos, que envolvem produtividade, dados de manejo da fertilidade do solo, entre outros (Fiorio, 2007).

Nos levantamentos topográficos, o GPS torna-se uma ferramenta importante no início do processo, pois é utilizado para fazer a demarcação dos pontos de base. Já na área de levantamento de solos, o objetivo é a divisão de áreas heterogêneas em áreas homogêneas, mediante parâmetros de classificação definidos para a diferenciação das classes de solos, em função da escala estabelecida para o mapeamento. Para tanto, torna-se necessário a seleção de perfis de solos para descrição morfológica e coleta de amostras de solos para a realização de análises físicas, químicas e mineralógicas. O GPS proporciona a demarcação geográfica desses perfis no campo, permitindo organizar esses dados espacialmente em um SIG, facilitando a delimitação das unidades de mapeamento e tornando-as mais precisas (Fiorio, 2007).

Da integração entre os sistemas GPS e o SIG, surgiu uma nova categoria de receptores e *softwares* GPS denominada de “Linha GIS (*Geographic Information System*)”. Esta nova geração de equipamentos gera como resultados, além dos tradicionais relatórios de rastreamento em formato de texto, roteiros preliminares, em formato digital que são posteriormente finalizados em *softwares* especializados (CAD – Computer Aided Design), ou empregados em conjunto como um pequeno banco de dados e atributos alfanuméricos diretamente em um SIG (Gorgulho, 2009).

III. OBJETIVOS

III. 1. Geral

Estabelecer o comportamento espectro-temporal da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no Distrito Federal e no município de Cristalina, por meio de espectrorradiometria, câmera digital e ASTER.

III. 2. Específicos

* Determinar a curva espectral da cultura do feijão (em estágios fenológicos diferenciados), do solo e da palhada associados, por meio de espectrorradiômetros, em áreas representativas com cultivos em sistema de plantio direto no Distrito Federal.

* Avaliar a proporção entre a cultura do feijão (em estágios fenológicos diferenciados), solo e palhada, por meio de classificação digital de fotografias verticais representativas da área de estudo.

* Identificar e individualizar a cultura do feijão em imagem de satélite ASTER, por meio de técnicas de processamento hiperespectral, utilizando as assinaturas espectrais estabelecidas do feijão, solo e palhada.

* Subsidiar dados para atividades de levantamento, monitoramento e mapeamento de áreas sob cultivo agrícola de feijão em imagens de satélite ASTER, a fim de fornecer dados de área plantada e de produção, que possam ser utilizadas em outras áreas agrícolas do Distrito Federal e em outras regiões produtoras de feijão.

IV. JUSTIFICATIVA

Justifica-se o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, em função da necessidade do monitoramento e mapeamento da ocupação agrícola da cultura do feijão, por meio de ferramentas de sensoriamento remoto, fornecendo dados de ocupação sustentável das terras e para previsão de safras mais rápida e menos onerosa.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, L. J. O. Monitoramento ambiental utilizando o sensoriamento remoto hiperespectral. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2., 2004, Aracajú/SE. **Anais...** Aracaju/SE: SRGSR, p. 16-29, 2004.
- ADAMS, J. B.; SABOL, D. E.; KAPOS, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A. R.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Classification of multispectral images based on fraction of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**. New York, v. 52, p. 137-154, 1995.
- ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM , 89., 1989. **Proceedings...** IGARSS, v.1, p 16-21. 1989.
- ADAMS, J. B.; SMITH, M. O. ; JOHNSON , P. E. Spectral mixture modeling a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. **J. Geophys**, v. 91, p. 8098-8112, 1986.
- AGUIAR, A. P. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; MASCARENHAS, N. D. A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.
- AL-ABBAS, A. H.; SWAIN, P. H.; BAUMGARDNER, M. F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, v. 114, p. 477-485, 1972.
- ALIXANDRINI JR, M. J. O potencial das imagens hiperespectrais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 2004, Santa Catarina. **Anais...** Santa Catarina: UFSC, 2004.
- ALMEIDA, T. **Modelos exploratórios para a prospecção de Pb/Zn utilizando dados de sensoriamento remoto: estudo de caso do prospecto salobro (Porteirinha – MG)**. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 132 p. Dissertação de Mestrado.
- ALMEIDA, R. N. T. **Paralelização de um classificador contextual de imagens**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 2000. Dissertação de Mestrado.

- ALMEIDA, T. I. R. **Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico regional e na prospecção mineral**. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005. 158 p. Tese de Livre Docência.
- ALMEIDA, T. I. R.; SOUZA FILHO, C. R. ASTER and Landsat ETM+ Images Applied to Sugarcane Yield Forecast. Submitted to **International Journal of Remote Sensing**. 2005.
- ALVARENGA, B. S.; D'ARCO, E.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R. O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 739-747, 2004.
- ALVARENGA, B. S.; D'ARCO, E.; MOREIRA, M. M. ; RUDORFF, B. F. T. Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens para a estimativa de áreas de arroz irrigado: um estudo de caso no município de Santa Vitória do Palmar/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 3961-3966, 2005.
- ANGULO FILHO, R.; CUNHA, C. A. H.; RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. Comportamento espectral da cultura do feijão (IAC-Carioca 80) irrigado com diferentes lâminas de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SELPER – INPE. 2001. CD-Rom.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY. Water Resources Assesment. In: **Manual of Remote Sensing**. Falls Church: p.1479-1522. 1975.
- AZCURRA, D.; CASTRO, G. S.; KAKU, M.; KOHNO, L.; MARIN, G. Procesamiento y productos ASTER del área de Sierra de Famatina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 815-822. 2003.
- AZEVEDO, J. A. **Efeito de diferentes lâminas de água e doses de adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.)**. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1984, 85 p. Dissertação de Mestrado.

- AZEVEDO, E. C.; MANGABEIRA, J.A.C. Mapeamento de uso das terras utilizando processamento digital de imagem de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: MAPA, **Comunicado Técnico**, 12p. 2001.
- BANNO, K. Oferta e comercialização de feijão no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE PRAGAS, DOENÇAS E PLANTAS DANINHAS DO FEIJOEIRO, 5., 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: coord. A. L. LOURENÇÃO et al., p. 27-44, 1994.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R.; PEDROSA, S. A. Relations between native vegetation and soil classes of Federal District, using ASTER Sensor. In: CONGRESO GEOLOGICO ARGENTINO, 17., Y SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE LA TELEDETECCION EN LAS CIENCIAS DA TERRA, 2., E SIMPÓSIO ASTER-GEOSAT, 2., 2008, San Salvador de Jujuy. **Anais...** San Salvador de Jujuy: Universidad Nacional de Jujuy, 2008.
- BAPTISTA, G. M. M. **Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA)**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001, 139p. Tese de Doutorado.
- BATISTA, G. T. Estudo do Comportamento Espectral das Principais Classes de Cobertura do Solo do Vale do Paraíba e Relação com o Índice de Área Foliar. E-Print **Ciências Agrárias** (<http://hdl.handle.net/2315/45>), v. 45, p 1-11. 2005.
- BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. **Introdução ao sensoriamento remoto e processamento de imagens**. INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2005.
- BATISTA, G. T.; RUDORFF, B. F. T.; OVIEDO, A. F. P. Resposta espectral da soja e sua relação com parâmetros agronômicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5, 1988, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v. 2, p. 406-413, 1988.
- BAUER, M. E.; VANDERBILT, V. C.; ROBINSON, B. F.; DAUGHTRY, S. T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY, 14., 1980, Hamburg. **Proceedings...** Bonn: International Society for Photogrammetry, p. 56-73, 1980.
- BAUMGARDNER, M. F.; KRISTOF, S. J.; JOHANNSEN, C. J.; ZACHARY, A. L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. **Proceedings**. Ind. Acad. Sci., v. 79, p. 413-422, 1970.

- BEN-DOR, E.; IRONS, J. R.; EPEMA, G. F. Soil reflectance. In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences: manual of remote sensing**. 3ª ed. New York: John Wiley, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. v. 3, p. 111-188, 1999.
- BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.4, p. 657-675, 1998a.
- BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evolution of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, v.66, n.3, p.273-285, 1998b.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM TENTH THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 10. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI. **Proceedings...**, v. 1, p. 407- 418, 1994.
- BÖHMER, C. R.; SCHÖFFEL, E.; MENDEZ, M.; RIBEIRO, D.; PAULA, V.; FRAGA, D. Albedo de morangueiro sob cultivo orgânico em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2007, Aracaju-SE. **Anais...** Aracaju/SE: CBAGRO, 2007.
- BOLUDA, R.; COLOMER, J. C.; MORELL, C.; SÁNCHEZ, J. Estudio de las curvas de reflectividad y su relacion con lãs propiedades de los suelos en zona semiarida (Castilla-la Mancha, España). In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE LA CIÊNCIA DEL SUELO, 1993, España. **Anais...** Salamanca, p.1-8, 1993.
- BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, p. 130 – 138, 1965.
- BROWN, D. **Methods of surveying and measuring vegetation**. Inglaterra: Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, 1954. 223 p.
- BRYANT, R. G. Validated linear mixture modeling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 17, n. 2, p. 315-330, 1996.
- CALLE, C. H. T. **Estudo de mineralizações de tipo Cu-Pórfiro do Sul do Peru por meio de sensoriamento remoto e aeromagnetometria**. Universidade Estadual de Campinas, 2000, 185 p. Tese de Doutorado.
- CALIJURI, M. L.; RÖHM, S. A. Sistemas de informações geográficas. Viçosa: CCET/DEC – Universidade Federal de Viçosa, **Imprensa Universitária**, 1994, 34p.

- CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de Cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v. 23, n. 2, 2005.
- CASTRO JUNIOR, R. M. **Introdução ao Sensoramento Remoto**. São José dos Campos, Laboratório de Topografia e Cartografia – Universidade Federal do Espírito Santo. 2001. 68p.
- CHAVES, J. M.; MOREIRA, L.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S.; FEITOZA, L. Uso da técnica de segmentação na identificação dos principais tipos de pastagens cultivadas do Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 31-33, 2001. Sessão Pôster.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Rialp, 1990. 451 p.
- COCHRANE, M. A.; SOUZA, C. M. Linear mixture model classification of burned forest in the Eastern Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 19, n. 17, p. 3433-3440, 1998.
- COLEMAN, T. L.; MONTGOMERY, O. L. Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. **Photogrammetry Engenhary Remote Sensing**, v. 53, p.1659-1663, 1987.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra Brasileira de grãos 2008/2009 – Sétimo Levantamento**. Brasília, 39 p. Publicação mensal. 2009.
- COSTA FILHO, P. L. D. R.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; OLIVEIRA, S. N.; SODRÉ, R. V. R.; MACHADO, W. P.; CHAVES, T. A.; MARTINS, E. S. Estudo preliminar da vegetação da parte do médio curso do Rio Indaiá (MG) utilizando imagem ASTER. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v. 13, p. 1631-1638. 2007
- CROSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, SP, IG/UNICAMP, 1992. 170 p.
- CROSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; AZEVEDO, F. Caracterizando halos de alteração hidrotermal em depósitos auríferos epitermais com os sensores multiespectrais orbitais Landsat/TM e ASTER: o caso do Distrito de Los Menucos, Argentina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, 2002. **Anais...** João Pessoa, Sociedade Brasileira de Geologia, 2002.

- CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; PETERSON, D. L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry Testing the Kokaly and Clark methodologies. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 349-359, 2001.
- DALMOLIN, R. S. D. **Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes**. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, 151 p. Tese de Doutorado.
- DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J.; NORTH, P. R. J.; PLUMMER, S. E. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 147-159, 1999.
- DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J.; PLUMMER, S. E. Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. **Remote Sensing of Environment**, v.65, p. 50-60, 1998a.
- DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J.; PLUMMER, S. E. The biochemical decomposition of slash pine needles from reflectance spectra using neural networks. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, p. 1433-1438, 1998b.
- DEERING, D. W. Field measurements of bidirecional reflectance. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1980. p.14-61.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Avaliação de atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.343-355, 1999.
- DETMENDY, D. M.; PACE, W. H. A model for spectral signature variability for mixtures. In: SHAHROKHI, F. (Ed.). **Remote Sensing of Earth Resources**. Tullahoma: University of Tennessee. v. 1, p. 596-620. 1972
- DUCARTI, F. D. **Caracterização da alteração hidrotermal associadas as ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância**. Unicamp – SP, 2004. Dissertação de Mestrado.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Arroz e Feijão. Sistemas de Produção. Nº 6. Versão Eletrônica. Janeiro. 2003.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, Embrapa Produção de informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

- ENGESAT. **Imagem de satélite**. Disponível em: <http://www.engesat.com.br>. Acesso em: 27/052009.
- EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto de três parâmetros agronômicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 10, p. 1615-1624, 1991.
- EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do estado de São Paulo**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, 1992, 131p. (Relatório INPE).
- EPIPHÂNIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, p. 439-447, 1994.
- EPIPHÂNIO, J. C. N.; VITORELLO, I. Interrelationships between view angles (azimuth) and surface moisture and roughness conditions in field measured radiometer reflectance of an Oxisol. In: INTERNATIONAL COLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE OF SENSING, 1984, Les Arc, France. **Proceedings...** Paris: INRA, v. 3, p.185-192. 1984.
- FARIAS, M. F. R.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; OLIVEIRA, S. N. de; SILVA, A. V. da; SILVA, M. R. da; OLIVEIRA, O. R. de; SILVA, R. M. Mapeamento de uso e ocupação do solo e detecção dos impactos ambientais utilizando imagens ASTER na bacia hidrográfica do Córrego do Atoleiro / Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007.
- FERRAZ, P.; ÂNGULO FILHO, R.; PIEDADE, S. M. S.; MONTEIRO, R. O. C. Influência do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 6335-6342. 2007..
- FERREIRA, P. C. G. Transgênicos e produtividade na agricultura brasileira. **História, Ciência e Saúde-Manguinhos**, v.7, n.2, p.509-512, 2000.
- FERREIRA, M. E. **Análise do modelo linear de mistura espectral na discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado)**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2003, 127 p. Dissertação de Mestrado.

- FERRI, C. P. **Utilização da reflectância espectral para estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [Glycine max (L.), Merrill]**. São José dos Campos: INPE, 2002. 173p.
- FIDALGO, E. C. C.; ABREU, M. B. Uso de imagens ASTER para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio São Domingos, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 3747-3753, 2005.
- FIORIO, P. R. **Apontamentos de aula: Tópicos Básicos de Cartografia e Sistemas de Posicionamento Global**. 2007. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Material Didático).
- FONSECA, L. M. G. **Processamento Digital de Imagens**: apostila do curso da disciplina de Processamento digital de imagens dada no curso de pós-graduação em sensoriamento remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Divisão de Processamento de Imagens. 2002.
- FORMAGGIO, A. R. **Características Agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e feijão**. Piracicaba. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – USP, 1989, 161 p. Tese de Doutorado.
- FORMAGGIO, A. R.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M. Comportamento espectral (450- 2500nm) e mineralogia de argila de alguns solos tropicais brasileiro. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Mérida/Venezuela. **Anais...** Mérida:INPE, p 6284, 1995.
- FORMAGGIO A. R.; EPIPHÂNIO J. C. N.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 467-474, 1996.
- FOURTY, T.; BARET, F. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p.1283-1297, 1998.
- FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHIMITH, R. S.; VIEIRA, E. M. Utilização de imagem ASTER na determinação de classes de uso do solo no município de Viçosa, MG, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.1297-1301, 2003.
- FREIRE, M. L. F.; BASTOS, E. J. B. Simulação da reflectância espectral planetária dos alvos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 16, n 2-3, 1998.

- FUCKNER, M. A. **Aplicação de imagens ASTER no estudo do ambiente urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. São José dos Campos: INPE, 2007, 230 p. Dissertação de Mestrado.
- GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T.; BAUER, M. F. Spectral estimation in corn canopies. **Agronomy Journal**, v.78, n.5, p.752-756, 1985.
- GALVÃO, L. S. **Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros**. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994, 191 p. Tese de Doutorado.
- GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discriminação de variedades de cana-de-açúcar com dados hiperespectrais do sensor EO-1/Hyperion. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 381-388, 2005.
- GARRIDO, M. A. T.; PURCINO, J. R. C.; LIMA, C. A. S. Efeito de diferentes regimes de irrigação sobre o rendimento do feijoeiro na região norte de Minas Gerais. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto Feijão: relatório 77/78**. Belo Horizonte, 1979. p.28-30.
- GASQUES, J. G.; REZENDE, G. C.; VILLA VERDE, C. M.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R., CARVALHO, J. C. S.; SALERNO, M. S. **Desempenho e crescimento do agronegócio no Brasil**. Brasília: IPEA, 2004. 48p.
- GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHALETER, J. C. ; WEINDER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v.4, n.1, p.11-20, 1965.
- GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n.11, p.1725-1734, 1985(a).
- GAUSMAN, H.W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light**. Lubbock, Texas: Texas Tech University, Graduation Studies nº 29, 78 p., 1985(b).
- GENÚ, A. M. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização e avaliação pontual e espacial de solos e seus atributos**. Piracicaba, 2006, 120 p. Tese de Doutorado.
- GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKNOVA, O. B. ; MERZLIAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v.75, n.3, p.272-281, 2002.
- GLOBALSAT. **Monitoramento Agrícola**. Disponível em:
<http://www.globalsat.com.br/sensoriamento/detalhes.php>. Acesso em: 20/04/2009.

- GODOY, S. E. C.; URAI, M.; KAKU, M.; KOHNO, I. Utilizacion da detos ASTER para monitoreo de volcanes y identificacion de productos volcánicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 465-473, 2003.
- GOETZ, A. F. H.; VANE, G.; SOLOMON, J. E.; ROCK, B. N. Imaging spectrometry for Earth remote sensing. **Soil Science**, v. 288, p. 1147-1153, 1985.
- GORGULHO, M. **Apostila de GPS**. Disponível em:
http://www.epamig.br/geosolos/MN_GEO/GPS.PDF . Acesso em: 21/04/2009.
- HUBBARD, B. E.; CROWLEY, J. K. Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: data dimensionality issues e solutions. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 173-186, 2005.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
- INFORZATO, R.; GUIMARÃES, G.; BORGONOV, M. **Desenvolvimento do sistema radicular do arroz e do feijoeiro em duas séries de solo do Vale do Paraíba**. *Bragantia*, v.23, n.30, p.365-370, 1964.
- INPE, DPI. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Divisão de Processamento de Imagens. **Processamento digital de imagens e suas técnicas**. 2005
- IPPOLITI, G.; GAGGERO, M. R.; COSTA, L. M. classificação digital de fotografias verticais para estimativa da cobertura do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 137-144, 2003.
- JAGO, R. A.; CUTLER, M. E. J.; CURRAN, P. J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. **Remote Sensing of Environment**, v.68, p. 206-216, 1999.
- JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 20, n.1, p.43-56. 1986.
- JACKSON, R. D.; TEILLET, P. M.; SLATER, P. N.; FEFOSEJEVS, G.; JASINSKI, M. F.; AASE, J. K. ; MORAN, M. S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery, **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n.2-3, p.189-202. 1990.
- JACQUEMOUD S; BARET F. Prospect: a model of leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, p 75 - 91. 1990.

- JACQUEMOUD S.; USTIN S. L.; VERDEBOUT J.; SCHMUCK G.; ANDREOLI G.; HOSGOOD B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, p. 194 – 202. 1996.
- JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING (JARS). **Remote Sensing**. Disponível em: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/rsnote/contents.htm>. acesso em 02/05/2009.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p.155-159, 1970.
- KOKALY, R. F.; CLARK, R. N. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 267-287, 1999.
- KOKALY R. F.; CLARK R. N.; LIVO K. E. Mapping the biology and mineralogy of Yellowstone National Park using imaging spectroscopy. In: JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 7., 1998, Pasadena, CA. **Proceedings...** JPL Publication 97-21, p. 235–244, 1998.
- KRUSE, F. A.; KIEREN-YOUNG, K. S.; BOARDMAN, J. W. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-Channel Imaging Spectrometer. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 1, p. 83-93, 1999.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. B.; HEIDEBREICHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J. ; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.
- LORENZZETTI, J. A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. Notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1º trimestre de 2002.
- LUIZ, A. J. B.; BARROS, M. G. M. de; FORMAGGIO, A. R.; EPHIPHANIO, J. C. N. Comportamento espectral associado a parâmetros agronômicos de soja (*Glycine max*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 103-110, 2001. Sessão Poster.
- MAAS, S. J. Linear mixture modeling approach for estimating cotton canopy ground cover using satellite multispectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 72, p. 304-308, 2000.

- MADEIRA NETTO, J. S.; POUGET, M.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B. Informações quantitativas sobre a mineralogia dos Latossolos a partir da reflectância espectral no visível e infravermelho próximo e médio (400 a 2.500 nm). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 249-255, 1993.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Boletim Técnico**. Disponível em:<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/servlet/VisualizarAnexo?id=114> Acesso em: 05/05/2009.
- MARKOSKI, P. R. **Avaliação de imagens do sensor ASTER para caracterização e mapeamento de rejeitos de garimpo de ametistas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006, 70 p. Dissertação de Mestrado.
- MARKOSKI, P. R.; ROLIM, S. B. A. Mapping amethyst mineralization using classification techniques in ASTER images: a case study in Ametista do Sul, Rio Grande do Sul state, Brasil. In: EUROPEAN CONGRESS ON REGIONAL GEOSCIENTIFIC CARTOGRAPHY, 5., AND INFORMATION SYSTEMS, 2006, Barcelona. **Anais...** Barcelona : Institut Cartogràfic de Catalunya, 2006.
- MARQUETTI, C.; MARIN, G.; KAKU, M.; KOHNO, L.; YOKOKAWA, K. Procesamientos y análisis de imágenes ASTER para el estudio metalogénico de maliman, San Juan, Argentina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 877-886, 2003.
- MARTIN, M. E.; NEWMAN, S. D.; ABER, J. D. ; CONGALTON, R. G. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v.65. p.249-254. 1998
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2 ed. Chichester: John Wiley ; Sons, 1999. 292 p.
- MATHEWS, H. L. CUNNINGHAM, R. L.; PETERSEN, G. W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society American. Proc.**, v. 37, p. 421-424, 1973.
- MENESES, P. R. **Fundamentos de Sensoramento Remoto**. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Sensoramento Remoto. Brasília – DF, 2009.122 p.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262p.

- MENDOZA ROJAS, E. H. **Síntese genética de redes neurais artificiais ART2 na classificação de imagens ASTER para mapeamento de uso e cobertura da terra na região norte do Mato Grosso**. São José dos Campos: INPE, 2004. 124p.
- MOREIRA, M. A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997, 142p. Tese de Doutorado.
- MOREIRA, A. M. **Fundamentos do sensoramento remoto e metodologia de aplicação**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.
- MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. Int. **Journal of Remote Sensing**, v. 8, n.12, p. 1807-27, 1987.
- NASCIMENTO, M. C.; RIVA, R. D. D.; CHAGAS, C. da S.; OLIVEIRA, H. de; DIAS, L. E.; FERNANDES FILHO, E. I. ; SOARES, V. P. Uso de imagens do sensor ASTER na identificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, vol.10 nº.1, 2006.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Dados de satélites**. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov>. e <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
Acesso em: 12 de março de 2009.
- NOVO; E. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher, 3 ed. 2008.
- PAZ, V. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. S. Efeito de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.). (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: CBEA, 1997.
- PACHECO, A. P.; RIBAS, N. S. Sensoriamento remoto aplicado ao uso da terra. **Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**. Geodésia online. 4/1998
- PEREIRA, R. S.; MADRUGA, P. R. de A.; HASENACK, H. **Geoprocessamento aplicado ao planejamento de uso de recursos naturais**. Curso. Santa Maria: UFSM – CCRFATEC, 40p. 1995.
- PINO, F.A. Estatísticas agrícolas para o século XXI. **Agricultura em São Paulo**, v. 46, n. 2, p. 71-105, 1999.
- PIROLI, E. L.; BECKER, E. L. S.; BOLFE, E. L. Análise do uso da terra na microbacia do Arroio do Meio – Santa Maria – RS, por sistema de informações geográficas e imagens de satélite. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n.3, p. 407 – 413, 2002.

- PIZARRO, M. A.; FERNANDES, D. Determinação de membros de referência em dados hiperespectrais pelo método da máxima entropia. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº 59/03, 2007.
- PIWOWAR, J. M.; DEREK, R. P.; LEDREW, E. Temporal mixture analysis of Arctic Sea ice imagery: a new approach for monitoring environmental change. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 63, p.195-207, 1998.
- POMPEU, A. S. Melhoramento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). In: **Feijão Fatores de Produção e Qualidade**. Coord. BULISANI, E. A. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.1-28.
- PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.157-195.
- PORTILLO, J. E.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; GÜRTLER, S.; BARRETO LUIZ, A. J. Evolução da superfície cultivada com as principais culturas agrícolas em Guará, Ipuã e São Joaquim da Barra - SP, via imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 215-222, 2003. Sessão Poster.
- PRICE, J. C. How unique are spectral signatures? **Remote Sensing of Environment**, v.49, p. 181-186, 1994.
- PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.6, p.1313-1330, 1991.
- RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340p.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 65, p. 267-279, 1998.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 5 ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003. 228 p.
- ROWAN, L. C.; MARS, J. C. Lithologic mapping in the Mountain pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 350-368. 2003.

- RUBIM, T. D. Spectral altrnation mapping with imaging Spectrometers. In: **Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing**. Denver, Colorado, p. 13-25, 1991.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T.; ASSAD, E. D.; STONER, E.; MOREIRA, L.; ITAMAR, P.; MACEDO, J. **Relatório da campanha de medidas radiométricas da soja no Distrito Federal - safra 88/89**. São José dos Campos: INPE, 1990.
- SANCHES, I. D.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Revista Agrícola São Paulo**, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.
- SCHRAMM, V. F.; VIBRANS, A. C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. **Dynamis Revista Tecno-Científica**, vol.13, n.1, p. 59-69, 2007.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensig: model and methods for image processing**. 2.ed. San Diego: Academic, 1997. 522p.
- SCHWEIK, C. M.; GREEN, G. M. The use of spectral mixture analysis to study human incentives, actions, and environmental outcomes. **Social Science Computer Review**, Thousand Oaks, v. 17, n. 1, p. 40-63, 1999
- SENSEMAN, G. M.; BAGLEY, C. F.; TWEDDALE, S. A. Correlation of rangeland cover measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. **Geocarto International**, v.11, n. 3, p. 29-38, 1996.
- SHERMAN, D.M. ; WAITE, T.D. Electronic spectra of Fe⁺³ oxide hydroxides in the near IR to near U.V. **Am. Miner**, v. 70, p.1262-1269, 1985.
- SHIMABUKURO, Y. S.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- SILVA, G. F. **Mapeamento de áreas irrigadas por pivô central nos municípios de Sorriso e Lucas do Rio Verde utilizando imagens CBERS CCD**. Cuiabá – MT, 2007. 53 p. Dissertação de Graduação.
- SILVA, M. K. A.; BRITO, J. L. S.; ROSA, R. Mapeamento do uso do solo no município de Pedrinópolis – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 285-291, 2003.
- SILVA, P. R.; DUCATI, J. R. Uso de técnicas de sensoriamento remoto e espectroradiometria, aplicadas a vinhedos de diferentes regiões do Rio Grande do Sul,

- Brasil. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, 10., 2005, Bento Gonçalves. **Anais...** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, v. 1. p. 285-285, 2005.
- SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constrains of spectral mixtures. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP. PASADENA, CA. **Proceedings...** JPL Publ., p. 62-68, 1985.
- SOUSA JUNIOR, J. G. A. **Sensoriamento remoto e informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos.** Piracicaba, 2005, 141 p. Tese de Mestrado.
- SOUZA, C. M.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forest in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, vol. 21, n. 1, p. 173-179, 2000.
- SOUZA, S. A. M; GONÇALVES, J. S.; VICENTE, J. R. Balança comercial dos agronegócios brasileiros no período 1997-2004: diferenças entre os resultados em dólar e em real. **Informações Econômicas**, v.32, n.1, p.7-16, 2006.
- SOUZA, C. C. de; MOREIRA, A. A. de; SCHIMITH, R. S.; BRANDÃO, P. C.; SILVAS, E. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil – uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, 2007.
- SOUZA FILHO, C. R., TÁPIA, C. H., CRÓSTA, A. P.; XAVIER, R. P. Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hidrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS), ANNUAL CONFERENCE – “TECNOLOGY: CONVERGING AT THE TOP OF THE WORLD”. **Proceedings...** p. 1-12. 2003.
- STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Tutorial de radiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 2-12, 1993.
- STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Data acquisition through remote sensing. In: BEATTY, M. T. (Ed.). *Planning the uses and management of land.* Madison: **American Society of Agronomy**, p. 159-185, 1986.

- SWALF, P. F. **Modelos exploratórios para depósitos auríferos do tipo de Morro do Ouro com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto**. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 118 p. Dissertação de Mestrado.
- TEIXEIRA, A. L. de A.; MORETI, E.; CHRISTOFOLETTI, A. **Introdução aos sistemas de informação geográfica**. Rio Claro: Ed. do Autor. 1992. 80p.
- TISOT, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L. S. ; RENNÓ, C. D. Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 439-446, 2005.
- VALERIANO, M. M. Reflectância espectral de culturas agrícolas anuais (I): Espectrorradiometria. **Revista Espaço e Geografia**, Brasília, DF, Departamento de Geografia da UnB, vol. 06, n. 1, p. 1-27, 2003.
- VAN DER MEER, F. Can we map swelling clays with remote sensing? **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.1, n.1, p. 27-35, 1999.
- VENTURIERI, A.; SANTOS, J. R. DOS. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas - Aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa – CPAC, 1998. 349-369p.
- VERONA, J. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R. Detecção de mudanças em áreas sob influência da Floresta Nacional do Tapajós-PA, utilizando o modelo linear de mistura espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 1773-1780, 2001.
- WAGNER, A. P. L. **Aplicação de imagens ASTER para estudos territoriais no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2004, 100 p. Dissertação de Mestrado.
- ZHOU, Q.; ROBSON, M.; PILESJÖ, P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 9, p. 1815-1820, 1998.
- ZHU, G. B.; BLUMBERG, D. G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: the case study of Beer Sheva, Israel. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.80, p.233-240, 2002.

ZORTEA, M.; ROBIN, V. H.; CLARKE, R. T. Investigação sobre métodos para redução da dimensionalidade dos dados em imagens hiperespectrais. **Revista Brasileira de Cartografia**, N° 57/01, 2005.

CAPÍTULO ÚNICO

COMPORTAMENTO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO FEIJÃO, POR MEIO DE ESPECTRORADIOMETRIA, CÂMERA DIGITAL E IMAGEM ASTER

RESUMO

A utilização de dados de reflectância obtidos por meio de espectroradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas e de metodologia para identificação e gestão dessas culturas, além da obtenção de informações para previsão de safras. O objetivo deste trabalho foi estabelecer o comportamento espectral da cultura do feijão, para individualizar áreas cultivadas no Distrito Federal (DF) e no município de Cristalina (GO). Foi selecionada uma área com cultura de feijão no DF, sob irrigação por pivô central, onde foram georreferenciados 30 pontos de amostragem. Em cada ponto de amostragem foram obtidas fotografias verticais representativas de 1m² de área superficial, em diferentes estágios fenológicos da cultura do feijão, para realizar o acompanhamento do desenvolvimento da cultura e o controle das interferências das diferentes proporções de solo e palhada na resposta espectral da cultura do feijão. Por meio de um sensor hiperespectral FieldSpec®3 foram coletadas as curvas espectrais do solo, palhada e das folhas de feijão nos estágios fenológicos avaliados. Com as curvas espectrais obtidas foram realizadas classificações espectrais da cultura do feijão, no Núcleo Rural Jardim (DF) e em uma área do município de Cristalina (GO) em imagem de satélite do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), por meio de dois métodos distintos (SAM - *Spectral Angle Mapper* e MLME - Modelo Linear de Mistura Espectral); mediante uso de processamento digital hiperespectral no *software* Envi 4.5. Há diferenças na resposta espectral da cultura do feijão nos diferentes estágios fenológicos avaliados quando obtidas em imagens de satélite devido a influência do solo e da palhada; a classificação espectral por meio do método SAM possibilitou a individualização adequada das áreas sob pivô central com cultura de feijão e a classificação espectral por meio do MLME permitiu a discriminação das áreas sob pivô central com cultura de feijão das demais culturas, apresentando-se como uma alternativa de uso para o levantamento, monitoramento e mapeamento de áreas sob cultivo agrícola de feijão em imagens de satélite ASTER.

Palavras Chave: Monitoramento e mapeamento agrícola, reflectância, curva espectral, cultura do feijão, classificação SAM (*Spectral Angle Mapper*), classificação MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral).

SPECTRO FLAW-BEHAVIOR OF THE BEAN CROP BASED ON DATA OBTAINED BY SPECTROMETER, DIGITAL CAMERA AND ASTER IMAGE

ABSTRACT

The use of reflectance data obtained by spectrometer, allows obtaining spectral response patterns of different crops, and make possible the establishment of identification methodology and management agricultural crops, in addition to obtaining information for crop yield prediction in a given region. The objective of this work was to establish the spectral behavior of the crop beans, to individualize areas in the Distrito Federal and other similar areas, through remote sensing techniques. Was selected a representative area of beans cultivation in the Distrito Federal, under irrigation center pivot, where 30 points were georeferenced sampling. At each sampling point were obtained vertical photographs representative of a surface area of 1m² in different phenological stages of the bean culture, to monitoring the culture development perform and control the interference of different proportions of soil and straw in the spectral response of the beans culture. By means of a hyperspectral sensor FieldSpec ® 3 the spectral curves were collected from soil, straw and leaves of the bean phenological stages evaluated. With the obtained spectral curves were made spectral classifications of crop beans in Núcleo Rural Jardim (DF) and in an area of the Cristalina (GO) municipality with a satellite image of the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensor, with two different methods (SAM - Spectral Angle Mapper and MLME - Linear Spectral Mixture Model), using hyperspectral digital processing in Envi 4.5 software. There are differences in the spectral response of crop beans in different phenological stages when obtained from satellite images, because of the influence of soil and straw, the spectral classification using the SAM method allowed the individualization of appropriate areas under irrigation central pivot with crop bean and spectral classification using the MLME, allowed the discrimination of areas under central pivot with culture of other beans crops, presenting itself as an alternative use for survey, monitoring and mapping areas under agricultural beans cultivation with ASTER satellite images .

Keywords: Monitoring and agricultural mapping, reflectance, spectral curve, growing beans, classification SAM (Spectral Angle Mapper), MLME classification (Linear Spectral Mixture Model).

I. INTRODUÇÃO

Devido à grande dimensão da agricultura no Brasil, torna-se importante o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na identificação e monitoramento das culturas agrícolas, contribuindo, assim, para a previsão de safras (Pino, 1999). No entanto, o monitoramento da produção agrícola é difícil, devido, principalmente, a grande quantidade de áreas plantadas e o seu difícil acesso.

Vários pesquisadores (Ferraz et al., 2007; Luiz et al., 2001; Epiphânio e Formaggio, 1991) vêm estudando imagens de satélite e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como uma ferramenta auxiliar na estimativa de áreas agrícolas plantadas, determinação da resposta espectral das culturas agrícolas e conseqüentemente na discriminação das espécies, de forma a servir como dados de entrada para os atuais modelos de crescimento e de produtividade agrícola (Angulo Filho et al., 2001).

Nesta linha de estudo, diversos autores têm buscado o conhecimento das propriedades espectrais da vegetação por meio das folhas, pelo fato de serem estes órgãos os principais responsáveis pelo comportamento espectral do dossel, devido à grande área exposta à radiação eletromagnética incidente e, também, em função das suas propriedades de reflexão, transmissão e absorção da radiação incidente (Ferri, 2002).

Acrescenta-se, que a cobertura do solo associa-se na resposta espectral da vegetação em proporções variadas, portanto, interfere na avaliação das culturas agrícolas, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. O estudo e reconhecimento das técnicas mais adequadas para a avaliação quantitativa da proporção de cobertura do solo, associada às culturas agrícolas diversificadas, apresentam importância para a geração de modelos que relacionem os dados observados no campo com os valores de reflectância registrados pelos sensores remotos (Senseman et al., 1996; Zhou et al., 1998).

As técnicas de análise espectral permitem uma boa estimativa para a identificação dos materiais de interesse, investigados pela similaridade entre a sua curva espectral de referência e a das imagens de satélite. Inicialmente, esta metodologia foi desenvolvida para análise de imagens de sensores hiperspectrais. No entanto, vários trabalhos vêm demonstrando bons resultados para a aplicação dessas técnicas em imagens multiespectrais, como as adquiridas pelo sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (Carvalho Júnior et al. 2005). As características das imagens deste sensor, que as diferenciam das tradicionalmente empregadas para tal fim, refere-se à presença de quatorze bandas espectrais, com resolução espacial de 15 metros nas bandas do visível e infra-vermelho

próximo (VNIR) e a presença de seis bandas na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR), com resolução espacial de 30 metros.

As imagens do sensor ASTER são utilizadas principalmente no monitoramento ambiental e também apresentam aplicações em relação ao uso e ocupação da terra (Zhu e Blumberg, 2002). Vários autores, tais como Silva et al. (2005) e Fidalgo e Abreu (2005) utilizaram imagens do sensor ASTER para desenvolver trabalhos de levantamento e elaboração de mapas de uso e classificação das terras, em função da sua boa resolução espacial. Os trabalhos foram realizados, respectivamente, em um município de MG e em uma bacia hidrográfica do Rio de Janeiro e ambos concluíram que as imagens ASTER utilizadas permitiram atingir os objetivos propostos, ou seja, a elaboração dos mapas de uso das terras e a avaliação da área ocupada. Barbosa et al. (2008), também, utilizaram imagens do sensor ASTER, submetidas a processamento hiperespectral, para avaliar a distribuição da vegetação nativa e a associação destas com classes de solos no Distrito Federal. Foram realizados processamentos digitais de imagens, como a razão banda3/banda2, para realçar o efeito foliar das clorofilas a e b, a razão banda3/banda1, com o intuito de realçar os pigmentos marrons (melanoproteínas), carotenóides e clorofila b nas folhas. Foram individualizadas várias classes de vegetações nativas que foram correlacionadas com classes de solos distintas. Os autores concluíram que a utilização de imagens do sensor ASTER com processamento digital hiperespectral é bastante eficiente na distinção de vegetação nativa e pode ser utilizada em auxílio aos mapeamentos pedológicos.

Já Silva e Ducati (2001) demonstraram a viabilidade de identificar vinhedos em imagens do sensor ASTER, entre outros tipos de vegetação. Medidas radiométricas em campo foram realizadas, provendo informações espectrais adicionais em relação às variedades de uva. Os resultados indicam que os dados das imagens ASTER contribuem de forma consistente para classificação e análise espectral de videiras, em função da melhor resolução espacial no visível e no infravermelho próximo (15m), aliada à utilização de bandas adicionais no infravermelho de ondas curtas, que melhoram as respostas espectrais, essencial em estudos de vegetação.

Segundo Adams et al. (1986) e Smith e Adams (1985) existe uma necessidade de exatidão taxonômica dos diversos tipos vegetacionais, que pode ser alcançada por meio da classificação espectral denominada SAM (Spectral Angle Mapper), aplicada a sensores hiperespectrais (espectrometria de imageamento) (Boardman e Kruse, 1994, Adams et al., 1989). Mais recentemente, têm-se observado avaliações satisfatórias no emprego desta metodologia, também, mediante sua adaptação a sensores multiespectrais, particularmente o

sensor ASTER, principalmente em estudos geológicos (Souza Filho et al. 2003; Hubbard e Crowley 2005), sendo ainda pouco utilizado no que refere ao mapeamento da vegetação.

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) também está vinculado às aplicações espectralradiométricas (hiperespectrais), porém, vem sendo utilizado com sucesso em imagens multiespectrais (Adams et al., 1995; Bryant, 1996). Ferreira (2003) pesquisou a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral para a discriminação das principais fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado), utilizando dados obtidos pelo sensor Landsat ETM⁺. Concluíram que este modelo apresentou um bom desempenho na discriminação de fitofisionomias da área estudada, com individualização de mata de galeria, campo limpo, campo sujo, cerrado, reflorestamento, solo exposto, entre outros.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto e particularmente a utilização de assinaturas espectrais de alvos, podem contribuir muito para a melhoria dos modelos de desenvolvimento e de produtividade agrícola, servindo como bons indicadores das condições gerais de vigor da cultura. Essa metodologia, no entanto, tem tido pouca aplicação, apesar do grande potencial desta para estudos de monitoramento e mapeamento da ocupação agrícola das terras, cuja demanda é cada vez mais crescente em função do grande desenvolvimento do setor no Brasil, particularmente na região Centro-Oeste.

Como a utilização de dados de reflectância, obtidos por meio de espectralradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas diversificadas, é possível o estabelecimento de metodologia para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos dessas culturas agrícolas, além da obtenção de informações para previsão de safras em uma dada região. Assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer o comportamento espectral para a individualização da cultura do feijão, a fim de fornecer dados para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos dessa cultura agrícola no Distrito Federal e outras regiões afins, mediante uso de técnicas de sensoriamento remoto.

II. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se levantamentos de dados bibliográficos sobre as respostas espectrais de culturas agrícolas, especialmente o feijão. Posteriormente foram realizadas saídas de campo para selecionar uma propriedade rural representativa do Distrito Federal com cultura de feijão sob irrigação por pivô central em sistema de plantio direto. A seleção de áreas cultivadas com feijão sob pivô central foi em função do imageamento por sensores orbitais, que é melhor na estação seca no Distrito Federal (entre agosto e dezembro), uma vez que na estação chuvosa, o imageamento é muito prejudicado pela presença de grande porcentagem de nuvens. Considerou-se, assim, o vigor vegetativo do feijão sob pivô central similar ao da estação chuvosa. Selecionou-se, também, através de imagem de satélite do sensor ASTER, uma área de Cristalina – GO com cultura permanente e de grande porte sob irrigação por pivô central.

II. 1. Caracterização das áreas de estudo

II. 1. 1. Núcleo Rural Jardim – Distrito Federal (DF)

A propriedade selecionada para realizar o estudo proposto localiza-se no Núcleo Rural Jardim, a sudeste do Distrito Federal, denominada Fazenda Santa Tereza (Figura 1).

A Fazenda Santa Tereza localiza-se na Área Isolada 06, Capão dos Porcos, DF 260 - Planaltina-DF, e apresenta 31 anos de atividades agrícolas, desde 1978. A área total pertencente à propriedade rural é de 4.200 hectares, sendo 3.750 ha cultiváveis (2.750 ha no DF e 1000 ha em GO) e 450 ha são destinados à Reserva Legal.

Dos 3.750 hectares, a propriedade apresenta 2.709 ha de produção de sequeiro e 1.041 ha irrigados, estes, estão distribuídos em 12 áreas sob pivô central, totalizando 840 ha no Distrito Federal e 02 áreas sob pivô central constituindo 201 ha no estado de Goiás. A produção da safra 2008/2009 nas áreas irrigadas por pivô central no Distrito Federal foi assim distribuída:

- Milho: 65.924 sacas de 60 quilos (400 ha – 9889 kg/ha),
- Feijão: 64.060 sacas de 60 quilos (1.610 ha – 2387 kg/ha),
- Soja: 68.224 sacas de 60 quilos (1.310 ha – 3125 kg/ha),
- Sorgo: 2.300 sacas de 60 quilos (30 ha – 4600 kg/ha), e
- Milho Semente: 35.000 sacas 60 quilos (400 ha – 5250 kg/ha).

As áreas sob pivô central com sistema de plantio direto utilizadas no estudo foram as de número 4 e 11, com cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), cultivar Pérola, em um espaçamento entre linhas de 0,5 m, sendo as áreas dos pivôs de 80 e 60 hectares, respectivamente. No pivô número 04, o feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) foi plantado no dia 24/06/2006 e colhido no dia 12/10/2006, com uma produtividade de 46 sacas/hectare. No pivô número 11, o plantio foi realizado em dias distintos, metade do pivô foi plantado no dia 24/09/2008 e a outra metade no dia 28/09/2008; o início da colheita foi no dia 08/01/2009 com uma produtividade de 50 sacas/hectare. Os dados de campo foram coletados no pivô de número 11, no período compatível com a realização deste trabalho, uma vez a cultura do feijão em ambos foi considerada semelhante.

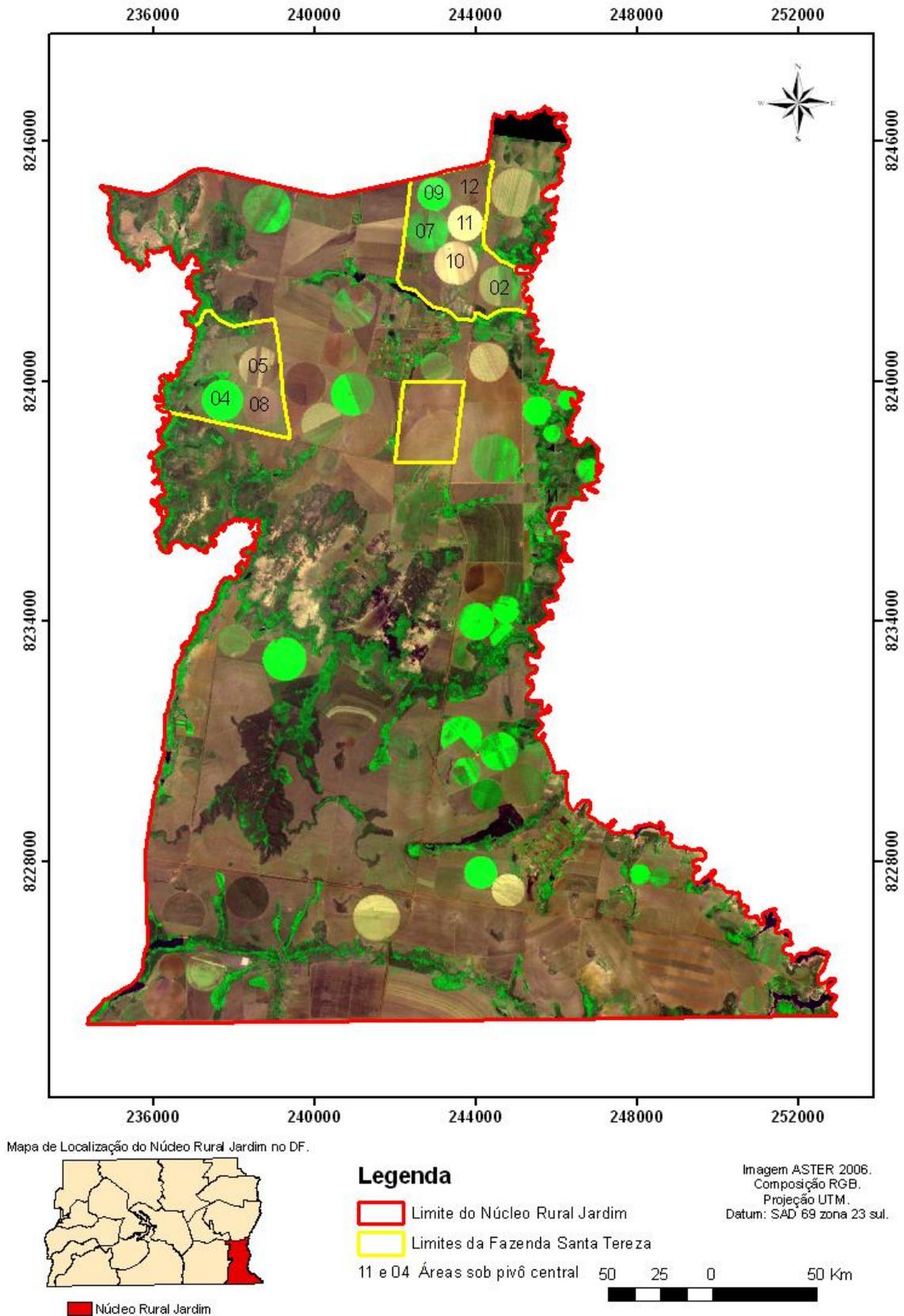


Figura 1. Imagem do sensor ASTER com a localização das áreas sob pivô central cultivados com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na Fazenda Santa Tereza, inserida no Núcleo Rural Jardim, DF.

II. 1. 1. 1. Pontos de amostragem

No pivô central de número 11, foram georreferenciados 30 pontos de amostragem, distribuídos em uma malha de aproximadamente 180 x 180 m, delineada por meio de GPS (*Global Positioning System*) manual de posicionamento absoluto, modelo GARMIN Map 60, Datum horizontal SAD-69, em coordenadas UTM, Fuso 23. Os pontos de amostragem foram devidamente estaqueados para sua localização e posterior coleta de dados (Figura 2).

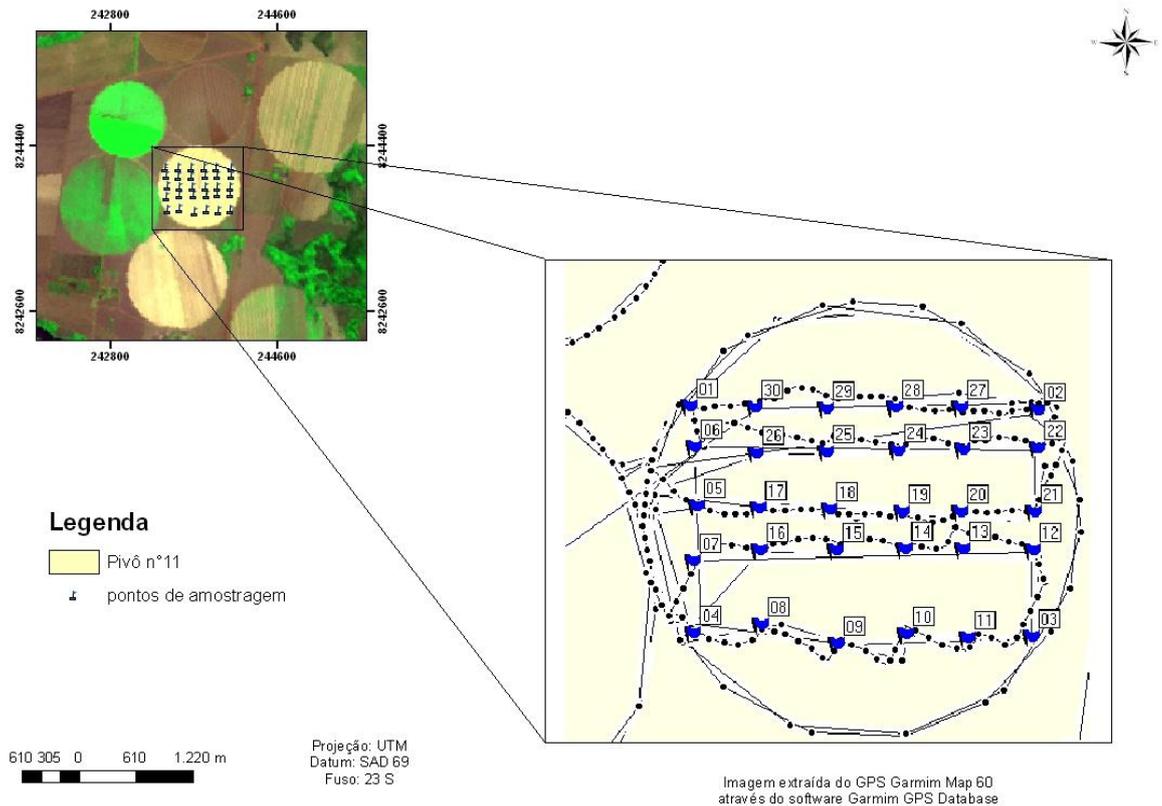


Figura 2. Identificação dos pontos de amostragem do pivô central de número 11.

Nestes pontos foi realizado o controle do desenvolvimento da cultura do feijão e foi verificada a proporção de feijão (em estágios fenológicos distintos), palhada e solo. Para esta avaliação foram obtidas fotografias digitais verticais em áreas de 1 x 1 m, dispostas a partir do centro dos pontos de amostragem, para posterior classificação digital de fotografias verticais automatizada por meio dos *softwares* Envi 4.5 e ArcGis 9.3, para a quantificação de feijão, solo e palhada. Nestes pontos foram, também, observadas as características do solo para a verificação da interferência do mesmo na resposta espectral dos alvos na área amostrada da cultura do feijão.

II. 1. 2. Cristalina – Goiás (GO)

Como na área de estudo do Núcleo Rural Jardim - DF não foi possível identificar outro tipo de cultura além do feijão, por meio da imagem do sensor ASTER utilizada, estendeu-se a área de investigação correspondente a toda a cena do sensor ASTER, para a realização dos processamentos digitais de imagens. Para tanto, a cena inteira foi submetida à análise visual a fim de verificar presença de outras culturas. No município de Cristalina, identificou-se uma área com uma série de áreas sob pivô central ocupadas com culturas permanentes e de porte alto, provavelmente café (Figura 3). Sendo, então, também selecionada para o estudo de classificação espectral a fim de individualizar culturas diferentes.

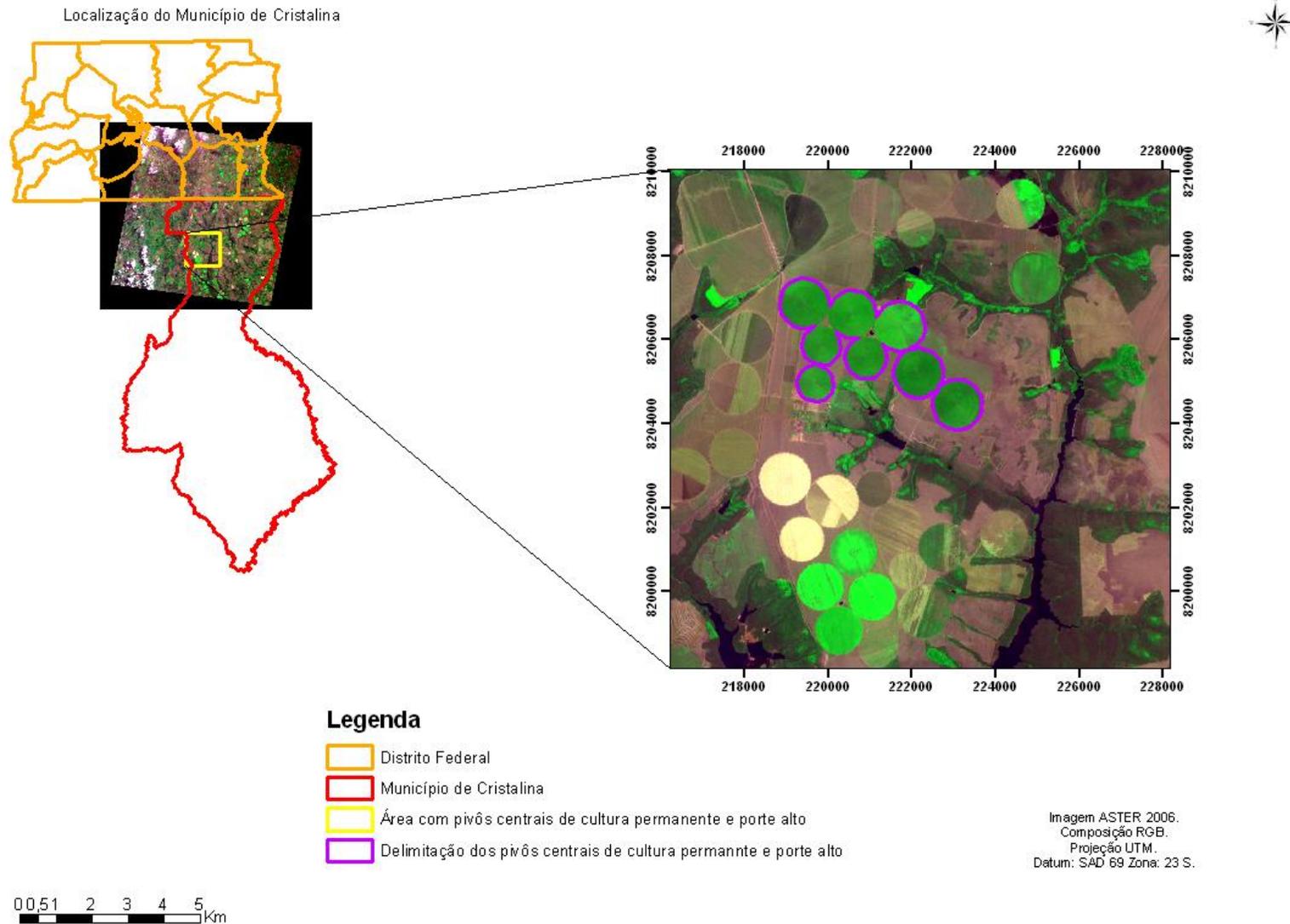


Figura 3. Imagem do sensor ASTER com a localização dos pivôs centrais de cultura permanente e porte alto na área do município de Cristalina, GO.

II. 2. Avaliação dos solos

O DF apresenta as principais classes de solos da região do Cerrado. A melhor fonte de informações sobre os solos encontrados no Distrito Federal é o trabalho realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos (Embrapa, 1978).

Segundo o trabalho citado, o Distrito Federal possui três classes de solos mais importantes, representados pelo Latossolos Vermelho-Escuros (Latosolos Vermelhos - LV), Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) e Cambissolo (C). Estes solos ocupam 85,49% da área do DF, sendo que, os Latossolos representam cerca de 54,48% desta área – Latossolos Vermelhos contribuem com 38,65% e os Latossolos Vermelho-Amarelos com cerca de 15,83%.

A classe de solo de ocorrência nas áreas estudadas sob irrigação por pivô central corresponde ao Latossolo Vermelho Distrófico típico.

II. 2. 1. Análise morfológica

Entre os atributos morfológicos avaliados nos solos dos 30 pontos da matriz de estudo, enfatizou-se a cor, que foi avaliada por meio da Carta de Munsell (Embrapa, 2006), para verificar variações de cor no solo. A cor foi enfatizada, pois este atributo está associado ao conteúdo de Fe_2O_3 no solo, cujos teores interferem significativamente na resposta espectral do solo.

II. 2. 2. Análises laboratoriais

Foram coletadas amostras compostas de solos, constituídas por três sub-amostras nos 30 pontos de controle da matriz de estudo estabelecida. A fração terra fina seca ao ar (TFSA) dos solos em estudo foram submetidas às análises químicas, com três repetições cada.

II. 2. 2. 1. Análise química (matéria orgânica)

A análise química realizada no complexo sortivo dos solos coletados nos 30 pontos da matriz de estudo foi a matéria orgânica por via úmida, por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, segundo metodologia proposta por Vettori (1969), descrita em Embrapa (1997). Entre os atributos químicos, foi destacada a variação do teor de matéria orgânica do solo estudado, visto que a diferenciação nos valores de matéria orgânica influencia na resposta espectral dos solos.

II. 2. 2. Análise física (textura do solo)

O método de Boyoucos (Embrapa, 1997) foi utilizado na análise granulométrica dos solos estudados nos 30 pontos da matriz referencial. O método se baseia na sedimentação das partículas que compõem o solo, separando as frações em areia, silte e argila. O controle da textura do solo dos pivôs centrais em estudo foi realizado, pois, também, é um atributo que interfere na resposta espectral dos solos.

II. 3. Confeção de mapas a partir dos dados laboratoriais dos solos

Com os resultados da análise química (matéria orgânica) e física (análise textural) dos solos nos 30 pontos da matriz de estudo, confeccionou-se mapas de distribuição destas variáveis no pivô central avaliado, por intermédio do *software* Surfer 7.0. O método de interpolação aplicado foi o de curvatura mínima, uma vez que esse método tem sido usado com eficiência nos estudos das ciências da Terra (Medina e Medina, 2007).

II. 4. Classificação das fotografias digitais verticais

Em cada ponto de amostragem da área sob pivô central de número 11 foram colocadas duas réguas de 1 metro, dispostas no centro de cada ponto amostral, formando um quadrante de 1m² de superfície. As fotografias verticais foram obtidas com uma câmara fotográfica digital, que capturou a resposta espectral em três bandas do espectro visível (vermelho: 0,63-0,69 µm; verde: 0,52-0,60 µm e azul: 0,45-0,52 µm), disposta na posição vertical sobre o quadrante por meio de suspensão manual a uma altura aproximada de 1,70 m.

Para o acompanhamento do desenvolvimento da cultura do feijão e o controle das variáveis proporções de solo e palhada na resposta espectral, as fotografias verticais foram obtidas em diferentes estágios fenológicos da cultura do feijão:

a) No dia 24/10/2008: 30 dias após o plantio do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) na metade do pivô central de número 11, correspondendo aos pontos 02, 03, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27 e 28 da matriz de estudo, em cerca de 30 ha.

a) No dia 24/10/2008: 26 dias após o plantio do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), na outra metade do pivô central de número 11, correspondendo aos pontos 01, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 15, 16, 17, 18, 25, 26, 29 e 30 da matriz de estudo, em cerca de 30 ha, já que o plantio de feijão foi realizado em duas etapas, e

b) 09/12/2008: 76 e 72 dias, respectivamente, após os plantios.

As fotografias digitais obtidas no campo foram classificadas para a obtenção das “cartas da cobertura” da área de amostragem de 1 m², representativas de cada ponto da matriz

amostral, a fim de individualizar as proporções de feijão, solo e palhada. Para a obtenção das cartas de cobertura, foi realizada classificação automatizada, utilizando o algoritmo de distribuição gaussiana por máxima verossimilhança (Maxver) (Mather, 1993; Richards, 1995), por intermédio do *software* ENVI 4.5. Depois de classificadas, as cartas de cobertura dos pontos amostrais foram implementadas no *software* ArcMap – ArcGIS 9.3 para a realização dos cálculos de área absoluta e percentual das área de amostragem de 1 m² de cada tema classificado (feijão, palhada e solo). O jogo de réguas de 1 m x 1 m utilizado foi, também, classificado, para posterior distribuição proporcional entre as classes de interesse. A proporção de feijão, solo e palhada foram calculados nos três estágios fenológicos avaliados, por meio de média aritmética simples das proporções de feijão, solo, palhada e régua.

Foram geradas, ao total, 60 “cartas de cobertura” dos pontos de controle da matriz de estudo, e para servir de exemplificação destas “cartas de cobertura” foram selecionados quatro pontos, sendo dois de cada época de plantio:

- Pontos 03 e 19 com o plantio realizado no dia 24/09/2008; e
- Pontos 09 e 17 com o plantio realizado no dia 28/09/2008.

Foram geradas as cartas de cobertura nos diferentes estágios fenológicos e optou-se por escolher pontos no centro (17 e 19) e na lateral (03 e 09) da matriz de estudo para verificar a variação do desenvolvimento da cultura mais detalhadamente, ao longo das áreas de estudo sob pivô central.

II. 5. Determinação da curva espectral da cultura do feijão

II. 5. 1. Determinação da curva espectral da cultura do feijão por meio do espectroradiômetro

Nos dias 28/10/2008 e 09/12/2008 foram coletadas no campo amostras representativas do feijão, do solo e da palhada associados nas áreas amostrais fotografadas do pivô central de número 11. Por meio do sensor laboratorial hiperespectral, FieldSpec@3, com leitura da radiação eletromagnética refletida no intervalo de comprimento de onda 0,350 a 2,500 µm, que corresponde às faixas do espectromagnético do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, foram realizadas as leituras das assinaturas espectrais do feijão, do solo e da palhada, no Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) da Faculdade de Geografia da Universidade de Brasília.

As leituras do comportamento espectral da “folha” de feijão, do solo e da palhada foram realizadas imediatamente após a coleta das amostras, com a repetição da leitura da folha de feijão durante os três dias subseqüentes, conforme descrita a seguir:

- Solo – dia 28/10/2008;
- Palhada – dia 28/10/2008;
- Folhas de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), variedade Pérola – dias 28, 29, 30 e 31/10/2008;
- Folhas de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), variedade Pérola – dias 09, 10, 11 e 12/12/2008.

II. 5. 2. Determinação da curva espectral do feijão por meio do sensor ASTER

Como as assinaturas espectrais foram obtidas no espectro eletromagnético contínuo, as mesmas foram reamostradas, por meio de operações disponíveis no *software* ENVI 4.5, para a resolução espectral do sensor ASTER, utilizando as três bandas do VNIR – Infravermelho Próximo (bandas 1 a 3 com 0,52 a 0,86 μm) e as seis bandas do SWIR – Infravermelho de Ondas Curtas (bandas 4 a 9 com 1,60 a 2,43 μm)

Para identificar a cultura do feijão por meio da curva espectral coletada pelo espectroradiômetro utilizou-se uma imagem do sensor ASTER do dia 20/09/2006, da região do Núcleo Rural Jardim – Distrito Federal. O pivô central cultivado com feijão utilizado como referência na imagem ASTER foi o de número 4. Este pivô foi utilizado em razão do pivô de número 11 não estar sendo cultivado no período de aquisição da imagem. Pôde-se observar, pelo histórico da área, que o feijão plantado no pivô 11 em 2008 e o plantado no pivô 04 de 2006 são de mesma cultivar (Anexo I) e possuem o mesmo sistema de plantio (plantio direto) e de irrigação. Desta forma, foi considerada a resposta espectral do feijão semelhante nas duas áreas de pivô central (números 4 e 11).

II. 6. Pré-Processamento das imagens ASTER

A imagem do sensor ASTER utilizada corresponde à cena de especificação ASTL1A_20.09.2006 e foi adquirida com a correção do efeito atmosférico. A correção atmosférica é essencial em estudos de reflectância de alvos, sob análise hiperespectral, pois remove os efeitos devido às mudanças de geometria satélite-sol e das condições atmosféricas.

Na etapa de pré-processamento digital hiperespectral foi realizada a junção entre as bandas dos sensores VNIR (faixa do espectro eletromagnético do visível e infravermelho próximo: bandas 1, 2 e 3) e SWIR (faixa do espectro eletromagnético do infravermelho de ondas curtas: bandas 4, 5, 6, 7, 8 e 9). A resolução espacial das bandas deste último sensor (SWIR) foi redimensionada de 30 para 15 metros, compatível à resolução espacial do sensor

VNIR, permitindo assim uma análise hiperespectral da imagem ASTER detalhada da área de estudo. Esta etapa foi concluída com a integração das nove bandas em uma única imagem.

II. 7. Determinação dos membros finais (*endmembers*)

Para a determinação dos membros finais (*endmembers*) foi utilizada as curvas espectrais contínuas obtidas pelo sensor laboratorial hiperespectral, FieldSpec®3, com leitura da radiação eletromagnética refletida no intervalo de comprimento de onda 0,350 a 2,500 μm . Assim, após individualizar as assinaturas espectrais nas classes de interesse (feijão, solo e palhada) montou-se uma biblioteca espectral, e a partir dela foi realizada a classificação espectral pelos métodos SAM (*Spectral Angle Mapper*) e MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral).

Este processo foi realizado em ambiente *ENVI* por meio da análise de mistura espectral utilizada para sensores hiperespectrais, adaptada para imagens de menor resolução espectral como o ASTER (multiespectral).

II. 8. Classificação espectral da imagem ASTER

II. 8. 1. Método SAM (Spectral Angle Mapper)

As curvas espectrais obtidas em laboratório, por meio do sensor laboratorial hiperespectral, FieldSpec®3, foram utilizados na classificação espectral a partir do método SAM disponível no *software* Envi 4.5, nas áreas de estudo correspondentes ao Núcleo Rural Jardim (DF) e o município de Cristalina (GO). A técnica SAM mede a similaridade entre os espectros da imagem de entrada com espectros de referência (Kruse et al., 1993).

Como não houve diferença entre as curvas espectrais das folhas de feijão dos dias 28/10 e 09/12, optou-se por utilizar como *endmembers* na classificação as curvas espectrais das folhas de feijão dos dias 28/10, 29/10, 30/10 e 31/10 (Figura 4).

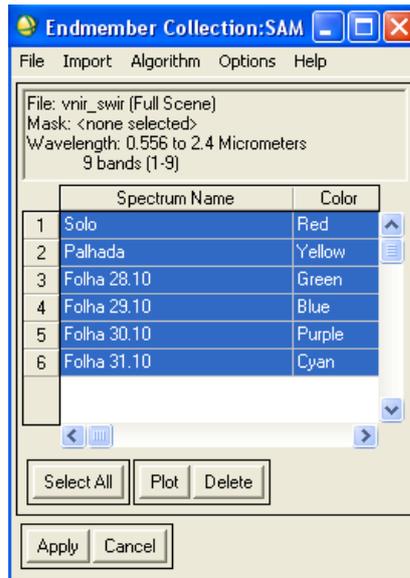


Figura 4. *Endmembers* utilizados para fazer a classificação SAM na imagem de satélite do sensor ASTER da área de estudo.

Para fazer a classificação SAM utilizaram-se dois ângulos, em radianos: 0,25 e 0,30, para verificar se há diferenças entre as classificações geradas por cada ângulo, pois segundo Costa Filho et al. (2007) o ângulo existente entre os vetores indica a similaridade dos espectros, que será maior à medida que o ângulo for menor

II. 8. 2. Método MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral)

O princípio básico do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é a decomposição linear dos dados originais em componente sombra, solo e vegetação (Alvarenga et al., 2005). Como resultado, obtém-se algo semelhante a uma “classificação suave” para cada componente analisado, onde áreas claras ou mais escuras na imagem indicam, respectivamente, uma maior ou menor proporção do alvo em estudo. Pode-se dizer, então, que o MLME representa um novo conceito de análise, ao nível de subpixel, onde é possível estabelecer uma nova regra para o mapeamento, não mais em função de limites rígidos, mas sim considerando a proporção física do alvo ao longo de toda a área analisada (Silva et al., 2008).

As assinaturas espectrais obtidas em laboratório, por intermédio do espectroradiômetro laboratorial hiperespectral, FieldSpec@3, foram utilizadas na classificação espectral a partir do método MLME disponível no *software* Envi 4.5, nas áreas de estudo correspondentes ao Núcleo Rural Jardim (DF) e o município de Cristalina (GO). Os *endmembers* utilizados nesta classificação estão representados na figura 5.

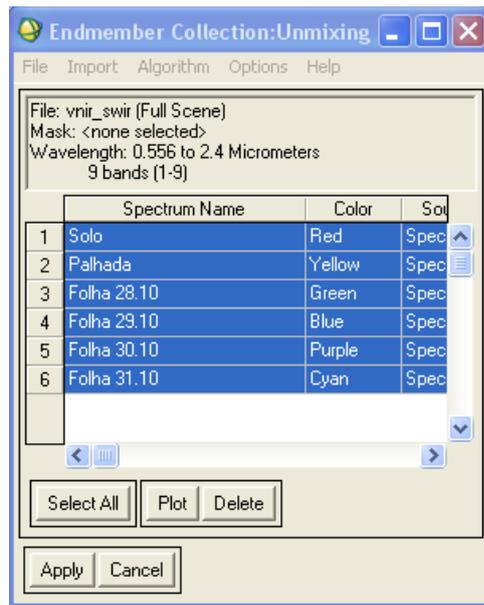


Figura 5. *Endmembers* utilizados para fazer o MLME na imagem de satélite do sensor ASTER da área de estudo.

Após realizar a classificação MLME, fez-se a composição RGB dos alvos, com o intuito de enfatizá-los: Red - solo; Green - palhada e Blue – feijão curva espectral do dia 28.10.2008. Com isso, os pivôs com cobertura de cultura do feijão no seu máximo vigor foram classificados com a coloração azul. Utilizou-se a curva espectral do feijão analisado pelo sensor hiperespectral FieldSpec@3 no dia 28/10/2008 por representar a curva do feijão com alto vigor.

Como o Modelo Linear de Mistura Espectral reduziu a dimensionalidade dos dados em uma imagem com 6 bandas, foi realizado um novo processamento digital para realçar os alvos de interesse, utilizando-se a classificação não-supervisionada Isodata.

No processamento do MLME houve a obtenção de uma imagem erro ou imagem RMSE (*Root Mean Square Error*), que tem como função principal indicar a qualidade dos *endmembers* utilizados no modelo. Utilizou-se as imagens erro do Núcleo Rural Jardim e da área estudada no município de Cristalina para verificar a exatidão da classificação pelo método MLME.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

III. 1. Avaliação dos solos

III. 1. 1. Análise morfológica

Na análise morfológica do atributo cor nos 30 pontos amostrais do pivô central número 11 da Fazenda Santa Tereza (Núcleo Rural Jardim, DF) (Tabela 1), os solos não apresentaram variação relevante de cor, mostrando coloração vermelha. O matiz manteve-se constante em 10R, havendo variações discretas apenas de valor e de croma, não apresentando, portanto, variações expressivas na resposta espectral.

Pela curva espectral obtida do solo (Figura 6), nota-se em toda a resposta espectral uma baixa reflectância, menor que 20%, pelo fato de serem solos com matiz vermelha (10R), concordando com Sousa Junior (2005). O comportamento espectral do solo estudado está de acordo com o comportamento espectral de Latossolos Vermelhos estudados por Demattê et al. (2004) e Galvão et al. (2006), onde o comportamento espectral dos Latossolos Vermelhos apresentou valores de reflectância inferiores a 20% no comprimento de onda de 1,5 μm , devido aos altos teores de Fe_2O_3 e a presença de minerais opacos, especialmente magnetita, conferindo assim, um aspecto liso à sua assinatura espectral. O alto teor de hematita e o elevado teor de argila resultam solos com baixo albedo, ou seja, reflectância baixa na faixa do visível e infravermelho, e mascaram as feições de absorção da água e dos outros minerais.

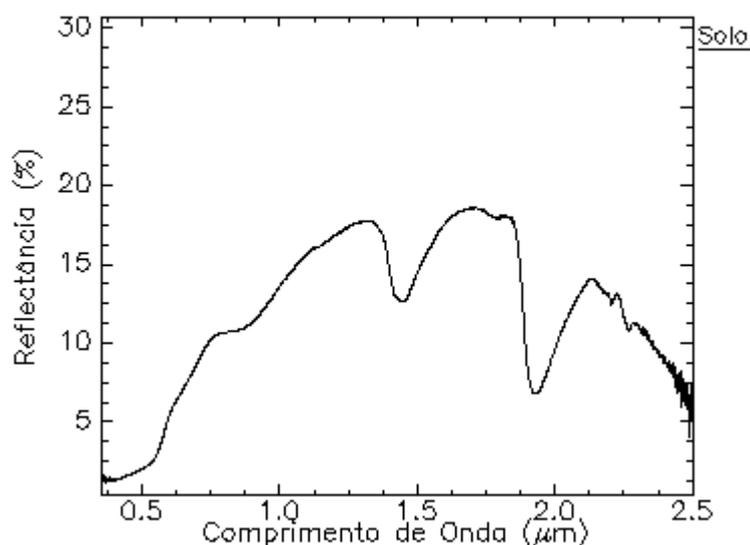


Figura 6. Resposta espectral do solo da área estudada no pivô central de nº 11 obtida pelo sensor hiperespectral, FieldSpec@3 no dia 28/10/2008.

Tabela 1. Resultado da análise morfológica do atributo cor do solo nos pontos amostrais do pivô central nº 11.

Pontos	Matiz	Cor
1	10R 4/6	Vermelho
2	10R 4/8	Vermelho
3	10R 4/8	Vermelho
4	10R 4/6	Vermelho
5	10R 5/6	Vermelho
6	10R 5/6	Vermelho
7	10R 4/8	Vermelho
8	10R 4/8	Vermelho
9	10R 4/6	Vermelho
10	10R 4/6	Vermelho
11	10R 5/6	Vermelho
12	10R 4/6	Vermelho
13	10R 4/8	Vermelho
14	10R 4/8	Vermelho
15	10R 5/6	Vermelho
16	10R 4/8	Vermelho
17	10R 4/6	Vermelho
18	10R 4/6	Vermelho
19	10R 4/6	Vermelho
20	10R 4/6	Vermelho
21	10R 5/6	Vermelho
22	10R 4/6	Vermelho
23	10R 5/6	Vermelho
24	10R 5/8	Vermelho
25	10R 5/6	Vermelho
26	10R 5/6	Vermelho
27	10R 4/6	Vermelho
28	10R 4/8	Vermelho
29	10R 4/6	Vermelho
30	10R 4/8	Vermelho

III. 1. 2. Análises laboratoriais

III. 1. 2. 1. Análise química (matéria orgânica)

As análises químicas dos teores de matéria orgânica (M.O.) no complexo sortivo das amostras de solo (tabela 2) mostraram que o solo apresenta pouca variação no teor de M.O. nos 30 pontos amostrais do pivô central número 11 da Fazenda Santa Tereza (Núcleo Rural Jardim, DF), mostrando valores considerados bons para os Latossolos sob uso agrícola do Cerrado (Goedert, 1985).

Tabela 2. Resultado da análise de matéria orgânica do solo nos pontos amostrais do pivô central nº 11.

Pontos	M.O. (g.kg⁻¹)
1	43,22
2	46,77
3	46,24
4	36,80
5	44,00
6	42,44
7	46,61
8	39,62
9	46,09
10	41,97
11	47,29
12	44,63
13	48,64
14	48,80
15	41,24
16	40,56
17	40,14
18	45,62
19	52,03
20	39,31
21	43,90
22	50,31
23	39,25
24	41,03
25	44,47
26	56,68
27	46,14
28	38,21
29	52,82
30	40,14

Onde: M.O.: matéria orgânica.

A variação na porcentagem de matéria orgânica pode ser observada na figura 7, onde os maiores valores de teor de matéria orgânica (> 47 g.kg⁻¹) encontram-se na parte central do pivô central nº 11 (tonalidade clara). Indica que nestes pontos há um ambiente menos favorável à decomposição da matéria orgânica, provavelmente, devido a uma concentração maior de água nestes pontos, atingida pela irrigação por pivô central. Já nas extremidades do

pivô (tonalidade mais escura), a porcentagem de matéria orgânica é menor ($< 42 \text{ g.kg}^{-1}$), refletindo o maior grau de decomposição da M.O.

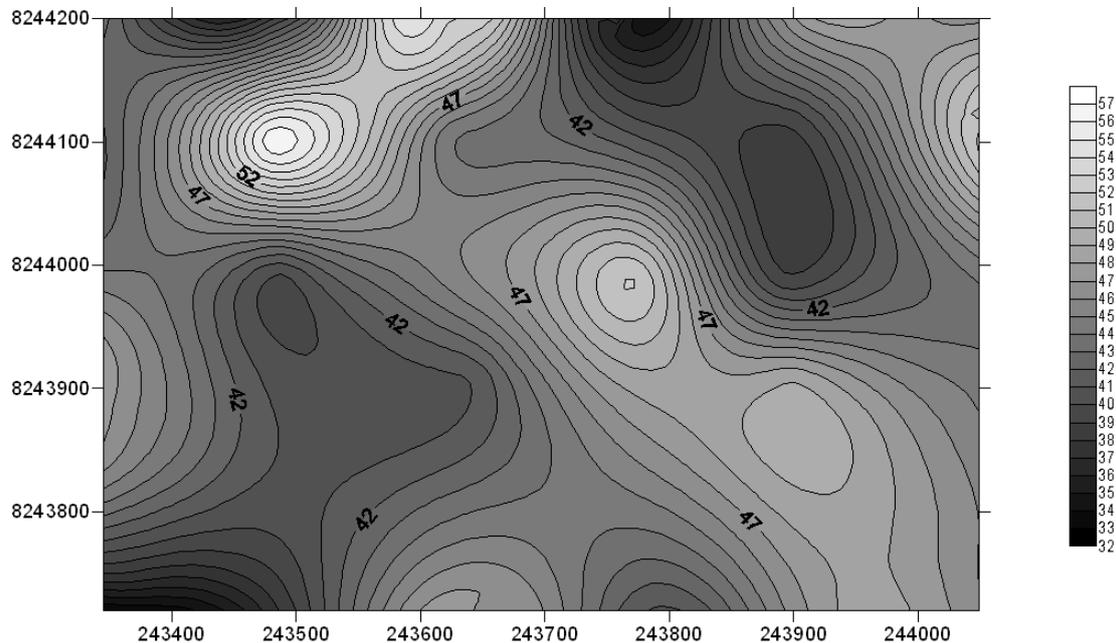


Figura 7. Mapa de teor de matéria orgânica (g.kg^{-1}) do pivô central nº 11.

A matéria orgânica interfere na coloração do solo, apresentando, portanto, uma estreita relação com a reflectância do solo, segundo Demattê et al. (2003). Existe uma correlação negativa entre matéria orgânica e reflectância dos solos; quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, maior é a absorção de energia eletromagnética e, conseqüentemente, menor a sua reflectância. Assim, infere-se que, a baixa reflectância do comportamento espectral do solo estudado é influenciado, também, pelos teores de matéria orgânica presentes neste solo. Autores como Dalmolin (2002), Demattê et al. (2003), Sousa Junior (2005) e Genú (2006) observaram um aumento da intensidade de reflectância em toda resposta espectral dos solos quando ocorre um decréscimo de matéria orgânica.

III. 1. 2. 2. Análise física (textura do solo)

Os resultados da análise textural das 30 amostras do solo do pivô nº 11 (Tabela 3) indicam que a textura do solo nos pontos de amostragem no pivô central variou de média a argilosa. Os solos classificados como textura média (Embrapa, 1979) engloba classe textural (Santos et al., 2005) de franco argiloso. As amostras de solos classificadas como textura

argilosa (Embrapa, 1979) apresentaram a classe textural, de acordo com Santos et al. (2005): argila.

As amostras de solos com textura argilosa situaram-se, em sua maioria, na porção nordeste do pivô central estudado, que pode ser observado no mapa de distribuição de teores de argila, apresentado na figura 8 (tonalidade cinza mais claro).

Já as amostras de solos classificados como de textura média (tonalidade cinza mais escuro) (Figura 8), localizaram-se na porção das bordas do pivô estudado. Quando se avalia o teor de areia (Figura 9), esta mesma região do mapa apresenta tonalidade cinza mais claro, por representar o mapa da distribuição dos teores de areia.

O teor de silte está elevado para solos do tipo Latossolos, devido ao defloculante utilizado (NaOH), que não consegue desagregar as partículas satisfatoriamente, o mais adequado seria utilizar o defloculante CALGON.

Tabela 3. Análise textural das amostras de solos do pivô central nº 11.

Pontos	Areia (g.kg⁻¹)	Silte (g.kg⁻¹)	Argila (g.kg⁻¹)	Textura
1	230	380	390	Franco Argiloso
2	230	360	410	Argila
3	230	410	360	Franco Argiloso
4	230	350	420	Argila
5	260	340	400	Argila
6	280	310	410	Argila
7	290	330	380	Franco Argiloso
8	260	310	430	Argila
9	270	380	350	Franco Argiloso
10	250	330	420	Argila
11	250	350	400	Argila
12	310	350	340	Franco Argiloso
13	250	340	410	Argila
14	310	360	330	Franco Argiloso
15	290	320	390	Franco Argiloso
16	300	340	360	Franco Argiloso
17	250	360	390	Franco Argiloso
18	270	300	430	Argila
19	280	330	390	Franco Argiloso
20	220	320	460	Argila
21	260	320	420	Argila
22	270	320	410	Argila
23	260	310	430	Argila
24	240	310	450	Argila
25	250	310	440	Argila
26	290	350	360	Franco Argiloso
27	240	350	410	Argila
28	260	350	400	Argila
29	260	310	430	Argila
30	310	300	290	Franco Argiloso

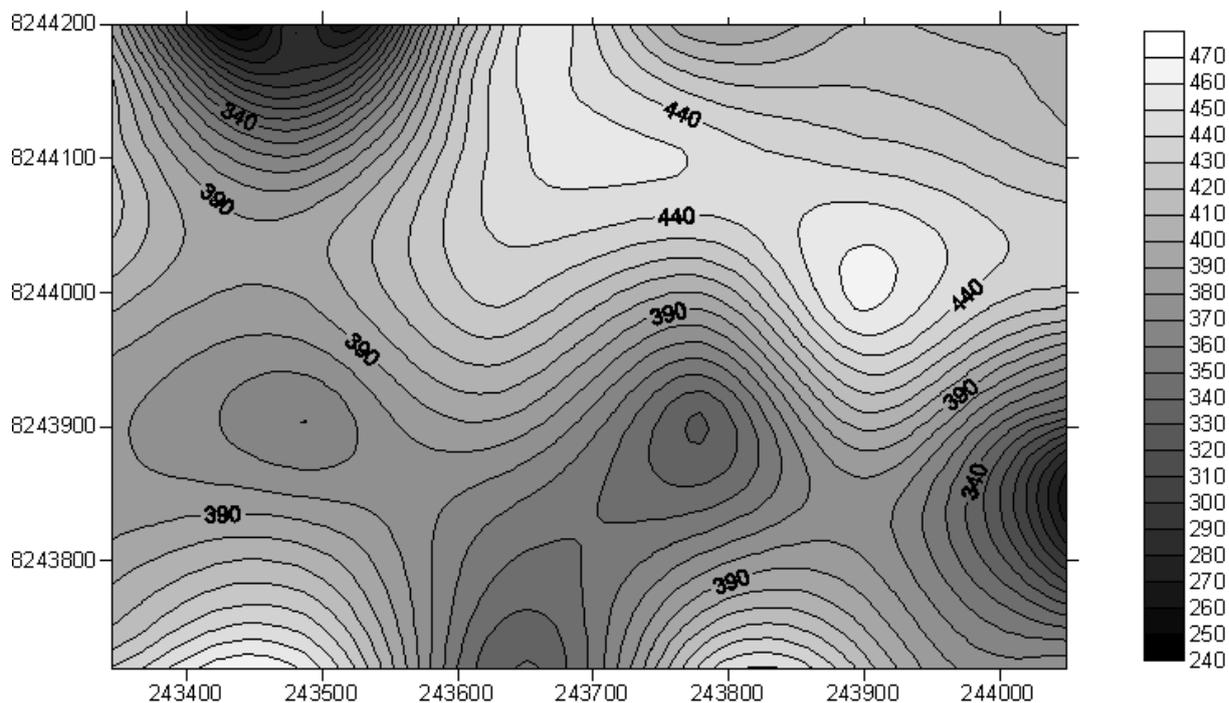


Figura 8. Mapa de distribuição dos teores de argila das amostras de solo do pivô central nº 11.

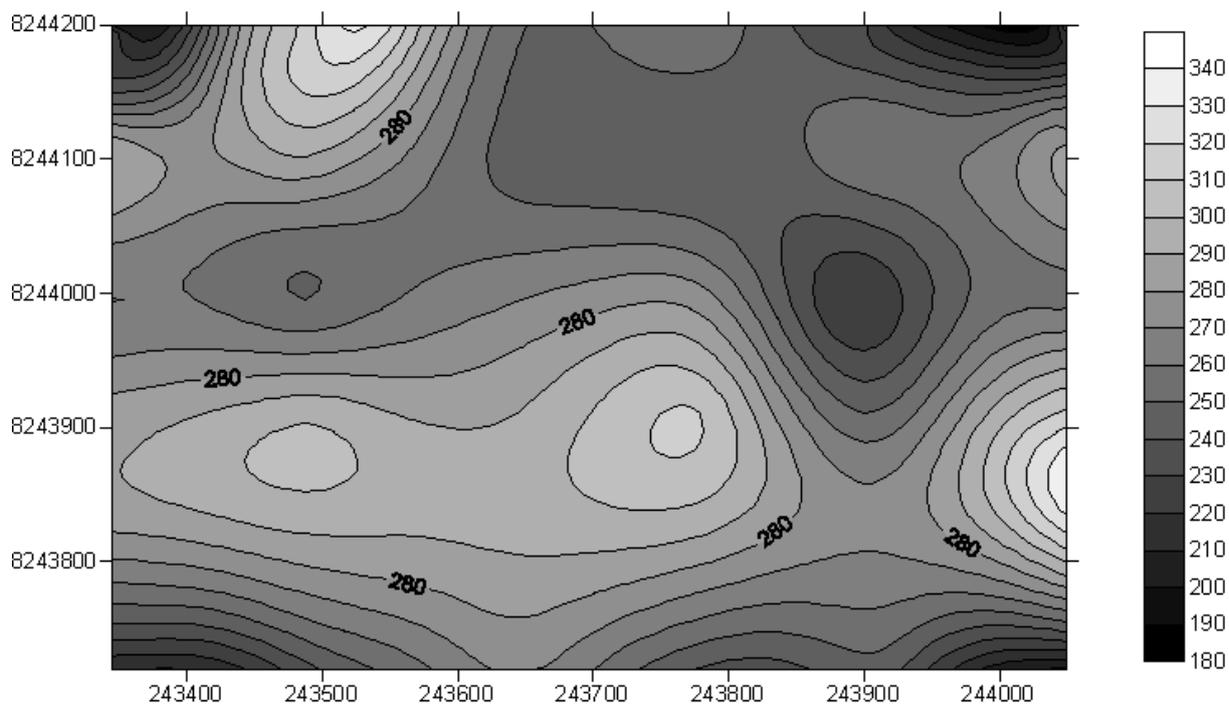


Figura 9. Mapa de distribuição dos teores de areia das amostras de solo do pivô central nº 11.

A distribuição do tamanho das partículas do solo e a presença de diferentes argilominerais influem na sua resposta espectral (Meneses e Madeira Netto, 2001). De

maneira geral, os solos de textura arenosa tendem a ter maior intensidade de reflectância do que os argilosos, notadamente quando a areia é dominada por quartzo (Resende et al., 2005), e também devido aos baixos teores de matéria orgânica e de Fe_2O_3 associados. Os solos estudados com teores predominantemente médios a altos de argila, apresentaram resposta espectral com baixas a moderadas intensidades de reflectância, concordando com os resultados obtidos por Barnes e Baker (2000) e Sousa Junior (2005) que obtiveram elevadas correlações positivas entre a reflectância do solo e o aumento da fração areia e elevadas correlações negativas com o aumento da fração argila.

III. 2. Classificação das fotografias verticais

Na classificação supervisionada, foram individualizadas as seguintes classes: feijão, solo, palhada e a régua. Em algumas fotografias foi originado sombreamento na região da palhada devido à posição do sol no momento em que a fotografia foi tirada.

Existe uma diferença de quatro dias entre no início do plantio de feijão no pivô estudado de nº 11; os pontos: 02, 03, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27 e 28 tiveram o plantio de feijão realizado no dia 24/09/2008 e os pontos: 01, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 15, 16, 17, 18, 25, 26, 29 e 30 no dia 28/09/2008.

Por meio das fotografias digitais verticais obtidas o dia 24/10/2008 (30 e 26 dias após os respectivos plantios) observou-se que há grande diferença entre a porcentagem de solo, palhada e principalmente de feijão entre os pontos amostrais, apesar da pequena diferença na data de plantio, quatro dias. Nas tabelas 4 e 5 pode-se observar a porcentagem de feijão, solo e palhada em cada área amostral.

Na tabela 4 encontram-se os pontos amostrais avaliados no pivô nº 11 que tiveram o seu plantio de feijão realizado no dia 24/09/2008. O maior valor de área ocupada pelo feijão, na área amostrada ($1m^2$), ocorreu no ponto 19, com $0,7784 m^2$. Os menores valores de porcentagem de feijão por área amostral foram verificados nos pontos 02 – $0,4847 m^2$, 03 – $0,5981 m^2$, 21 – $0,5199 m^2$, 22 – $0,5931 m^2$, 24 – $0,5883 m^2$, 27 – $0,5052 m^2$ e 28 – $0,5031 m^2$), causados, provavelmente, pelo efeito de borda do pivô, já que estes pontos encontram-se nessa porção do pivô estudado, onde as culturas, geralmente sofrem mais os intempéries do clima e tem um desenvolvimento aquém das outras regiões do pivô central. Acrescenta que nestes pontos, devido a sua localização, não recebem uniformemente a água de irrigação que é distribuída no campo. Segundo Scaloppi e Dias (1996) a falta de uniformidade na irrigação tem efeito negativo no rendimento das culturas e é considerado um dos fatores mais importantes no dimensionamento e na operação de sistemas de irrigação.

A área de palhada por m^2 variou conforme a área de feijão, pois os pontos que tiveram maior quantidade de feijão por m^2 (pontos 10 – 0,7282 m^2 , 14 – 0,7649 m^2 e 19 – 0,7784 m^2) apresentaram os menores valores de palhada, em torno de 0,20 m^2 , já que o feijão recobre a superfície do solo. A porcentagem de solo nestes pontos foi pequena, não atingindo nem 5% da porcentagem total. Foi observado que apenas seis áreas amostrais (02, 22, 23, 24, 27 e 28) tiveram um valor maior de 0,10 m^2 de solo, devido a menor presença de palha e de feijão, pois estes pontos encontram-se na mais próximo da borda do pivô.

Na tabela 5 encontram-se os pontos que tiveram o seu plantio realizado no dia 28/09/2008. Os maiores valores de porcentagem de feijão por área amostral foram menores que nas áreas amostrais onde o feijão foi plantado no dia 24/09/2008 (Tabela 4), tendo um máximo de 0,5931 m^2 (ponto 09). Os menores valores de porcentagem de feijão (< 40%) na área amostrada ocorreram nos pontos das extremidades (05 – 0,3749 m^2 , 26 – 0,3904 m^2 e 29 – 0,3888 m^2); possivelmente devido ao efeito de borda do pivô. A palhada apresentou maiores valores nestes pontos pelo fato da área ocupada pelo feijão ser menor; e nos pontos amostrais em que o feijão teve maiores valores de área, tal como o ponto 09 com 0,5931 m^2 , ocorreram baixos valores de palhada (35,87% no ponto 09).

Assim, como nos pontos da tabela 4, os pontos amostrais da tabela 5 apresentaram pequena área de solo exposto por m^2 indicando que a área está bem coberta por palhada. Em somente sete pontos avaliados (01, 05, 08, 16, 26, 29 e 30) foram verificados valores maiores que 0,10 m^2 de solo, obtendo um máximo de até 24,14% (ponto 30) de solo, devido à menor área de feijão e palhada encontrados nestes pontos causados, pelo efeito de borda do pivô.

Tabela 4. Área em metros quadrados (m²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 24/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 24/10/2008.

Ponto 2			Ponto 3		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,4847	48,47	Feijão	0,5981	59,81
Palhada	0,3006	30,06	Palhada	0,3006	30,06
Solo	0,2147	21,47	Solo	0,1013	10,13
Ponto 10			Ponto 11		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,7282	72,82	Feijão	0,6204	62,04
Palhada	0,2282	22,82	Palhada	0,3775	37,75
Solo	0,0436	4,36	Solo	0,0021	0,21
Ponto 12			Ponto 13		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,6627	66,27	Feijão	0,6978	69,78
Palhada	0,2714	27,14	Palhada	0,2504	25,04
Solo	0,0659	6,59	Solo	0,0518	5,18
Ponto 14			Ponto 19		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,7649	76,49	Feijão	0,7784	77,84
Palhada	0,1988	19,88	Palhada	0,1991	19,91
Solo	0,0383	3,83	Solo	0,0225	2,25
Ponto 20			Ponto 21		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,6754	67,54	Feijão	0,5199	51,99
Palhada	0,2179	21,79	Palhada	0,3946	39,46
Solo	0,1067	10,67	Solo	0,0855	8,55
Ponto 22			Ponto 23		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,5931	59,31	Feijão	0,6243	62,43
Palhada	0,2778	27,78	Palhada	0,2444	24,44
Solo	0,1291	12,91	Solo	0,1313	13,13
Ponto 24			Ponto 27		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,5883	58,83	Feijão	0,5052	50,52
Palhada	0,2795	27,95	Palhada	0,3372	33,72
Solo	0,1322	13,22	Solo	0,1576	15,76
Ponto 28					
	Área (m ²)	Área (%)			
Feijão	0,5031	50,31			
Palhada	0,2612	26,12			
Solo	0,2357	23,57			

Tabela 5. Área em metros quadrados (m²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 28/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 24/10/2008.

Ponto 1			Ponto 4		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,4059	40,59	Feijão	0,5767	57,67
Palhada	0,4571	45,71	Palhada	0,3784	37,84
Solo	0,1370	13,70	Solo	0,0449	4,49
Ponto 5			Ponto 6		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,3749	37,49	Feijão	0,4850	48,50
Palhada	0,5188	51,88	Palhada	0,4254	42,54
Solo	0,1063	10,63	Solo	0,0896	8,96
Ponto 7			Ponto 8		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,5664	56,64	Feijão	0,4706	47,06
Palhada	0,3775	37,75	Palhada	0,4239	42,39
Solo	0,0561	5,61	Solo	0,1055	10,55
Ponto 09			Ponto 15		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,5931	59,31	Feijão	0,5552	55,52
Palhada	0,3587	35,87	Palhada	0,3762	37,62
Solo	0,0482	4,82	Solo	0,0686	6,86
Ponto 16			Ponto 17		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,4003	40,03	Feijão	0,5102	51,02
Palhada	0,4071	40,71	Palhada	0,4026	40,26
Solo	0,1926	19,26	Solo	0,0872	8,72
Ponto 18			Ponto 25		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,5748	57,48	Feijão	0,5214	52,14
Palhada	0,3681	36,81	Palhada	0,4181	41,81
Solo	0,0571	5,71	Solo	0,0605	6,05
Ponto 26			Ponto 29		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,3904	39,04	Feijão	0,3888	38,88
Palhada	0,5070	50,70	Palhada	0,3992	39,92
Solo	0,1026	10,26	Solo	0,2120	21,20
Ponto 30					
	Área (m ²)	Área (%)			
Feijão	0,4592	45,92			
Palhada	0,2994	29,94			
Solo	0,2414	24,14			

Obteve-se um total de 30 fotografias verticais de todos os pontos de controle da matriz de estudo no dia 24/10/2008, e a figura 10 mostra quatro destas fotografias verticais consideradas representativas do local, referentes aos pontos 03, 09, 17 e 19 que tiveram diferentes datas de início de plantio:

- Pontos 03 e 19 com o plantio realizado no dia 24/09/2008; e
- Pontos 09 e 17 com o plantio realizado no dia 28/09/2008.

E as figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam as “cartas de cobertura” provenientes dos resultados da classificação supervisionada nestes quatro pontos de controle.



Figura 10. Fotografias verticais dos pontos 09 (a) e 17 (b) (com plantio realizado no dia 28/09/2008); 03 (c) e 19 (d) (com plantio realizado no dia 24/09/2008). As fotografias foram tiradas no dia 24/10/2008.

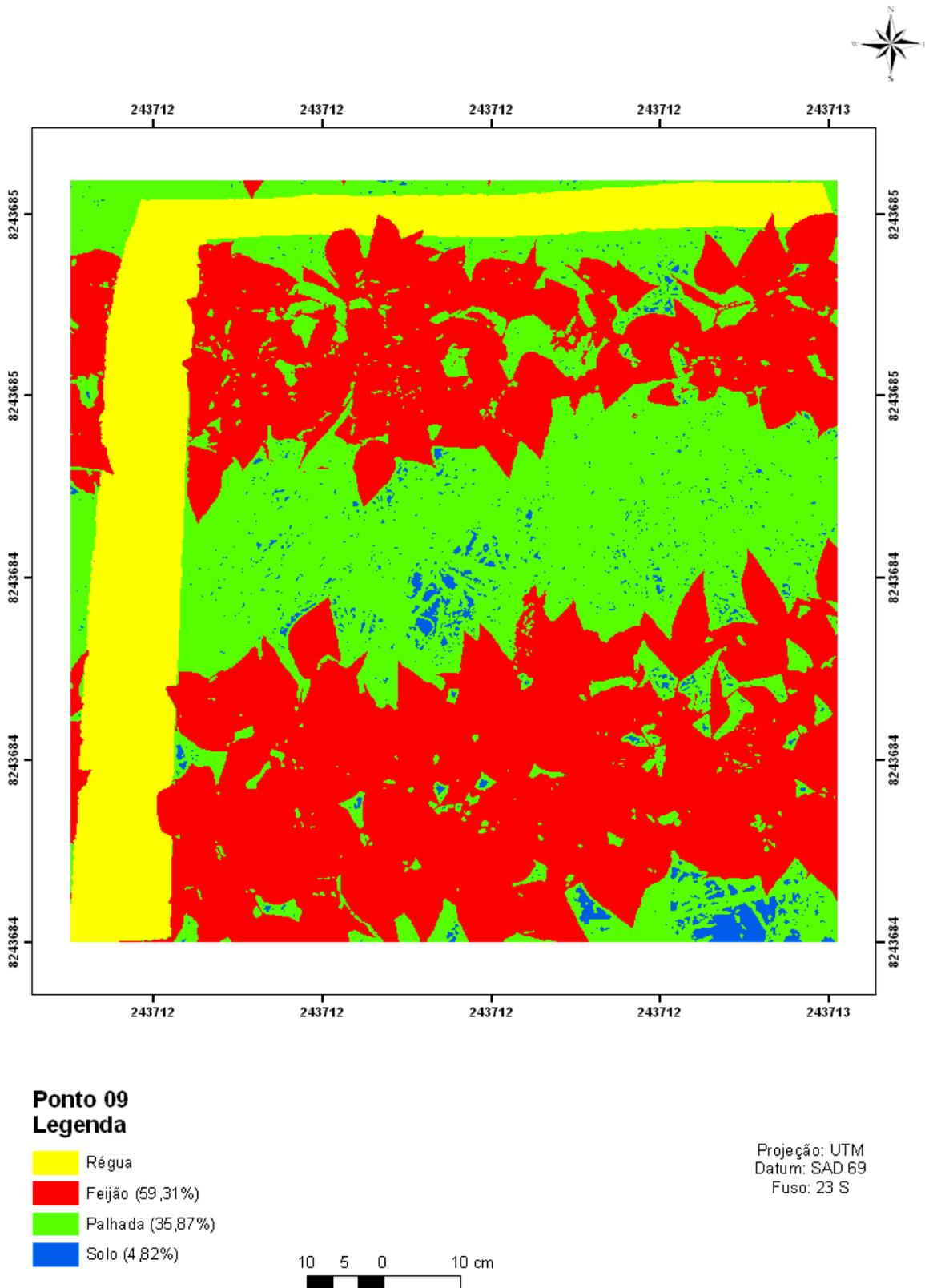


Figura 11. Classificação supervisionada do ponto 09, fotografado no dia 24/10/2008 (26 dias após o plantio).

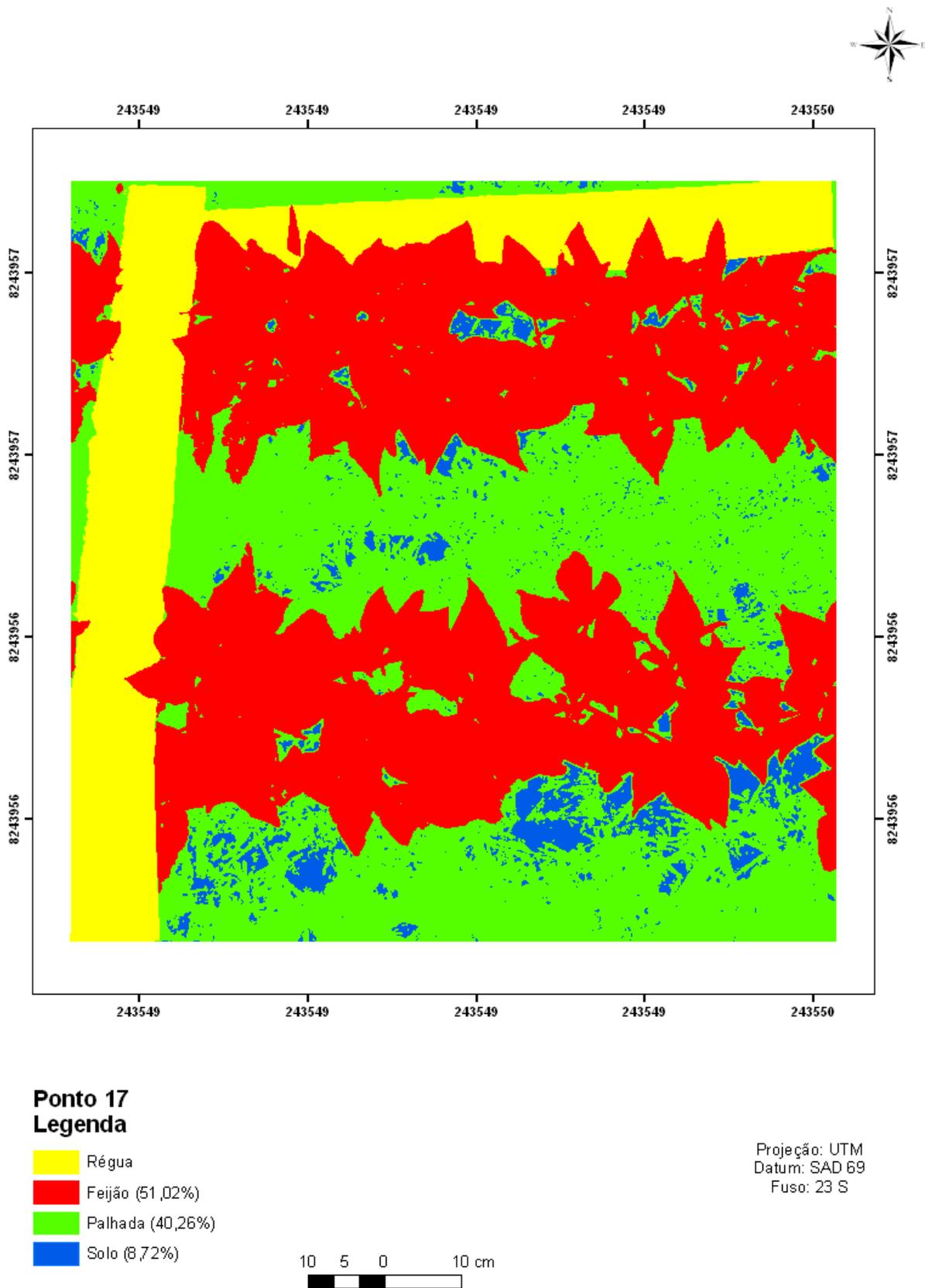
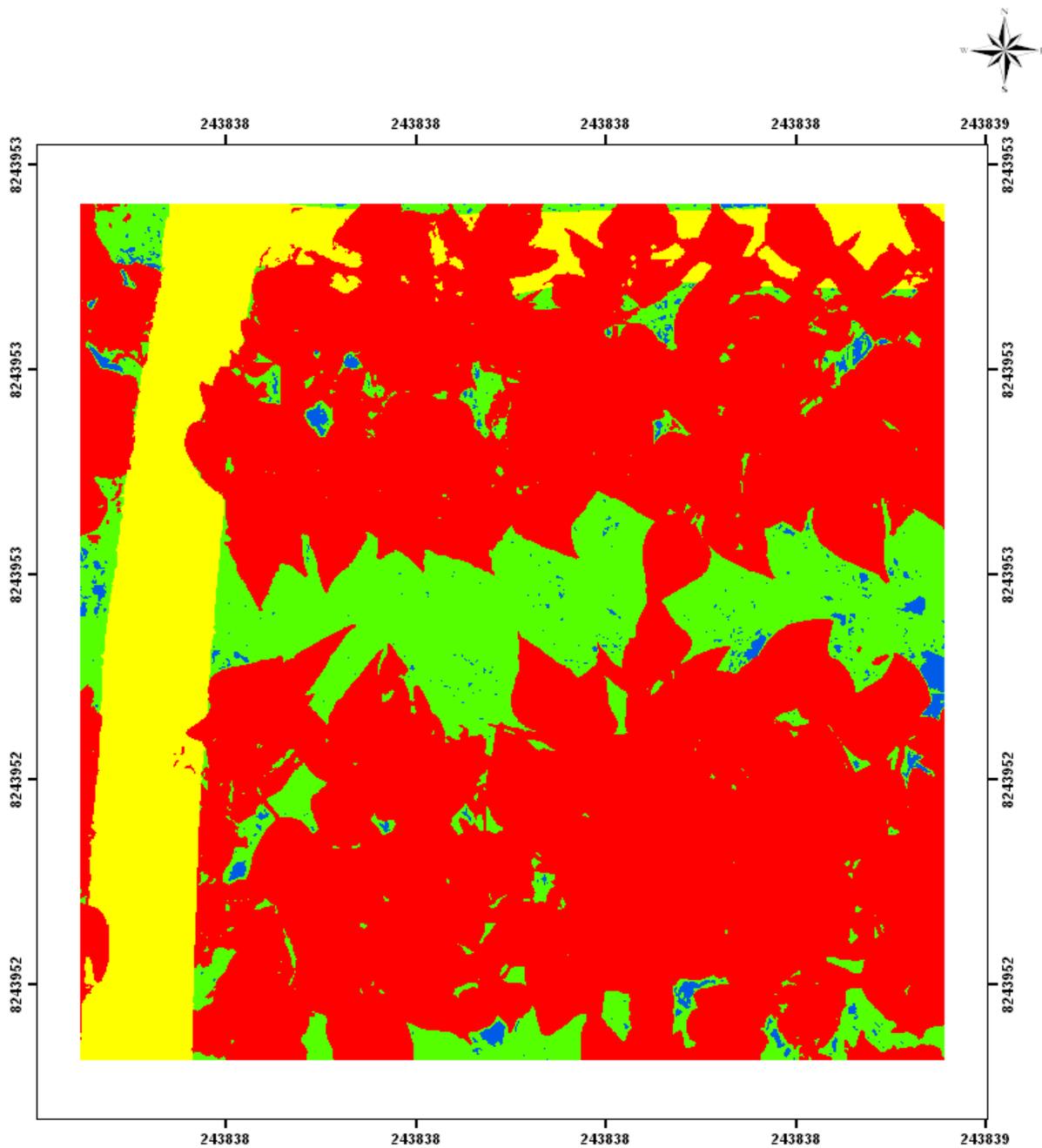


Figura 12. Classificação supervisionada do ponto 17, fotografado no dia 24/10/2008 (26 dias após o plantio).



**Ponto 19
Legenda**

- Rêgua
- Feijão (77,84%)
- Palhada (19,91%)
- Solo (2,25%)

Projeção: UTM
Datum: SAD 69
Fuso: 23 S

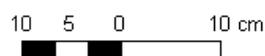


Figura 13. Classificação supervisionada do ponto 19, fotografado no dia 24/10/2008 (30 dias após o plantio).

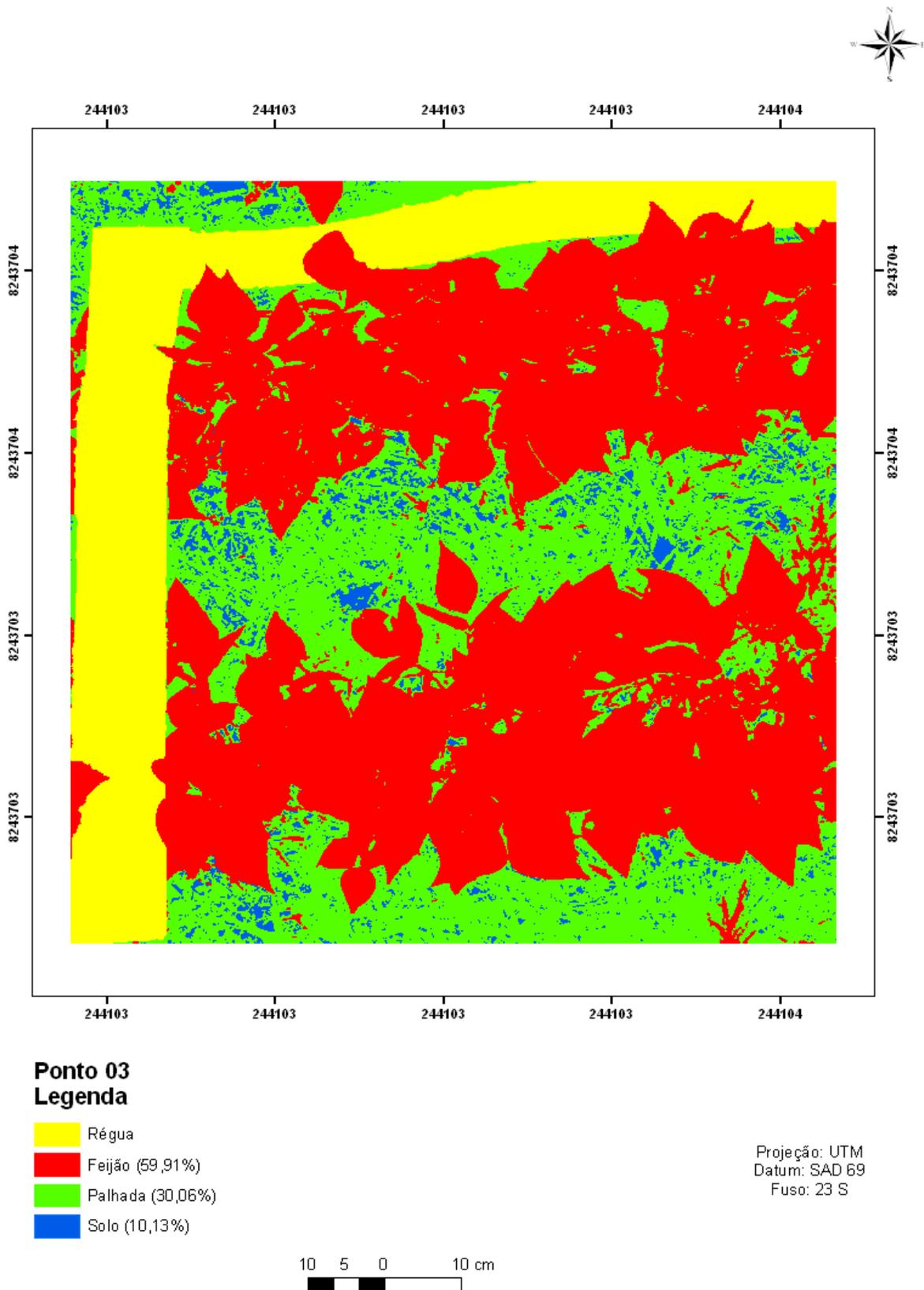


Figura 14. Classificação supervisionada do ponto 03, fotografado no dia 24/10/2008 (30 dias após o plantio).

Observa-se nas classificações temáticas realizadas, apresentadas nas figuras 13 e 14 correspondentes às fotografias verticais obtidas nos pontos amostrais 19 e 03, cujo plantio do feijão foi realizado no dia 24/09/2008, apresentaram 77,84% e 59,91% de feijão, respectivamente, representando uma maior porcentagem que as fotografias obtidas nos pontos 09 e 17 (59,31% e 51,02%, respectivamente) que tiveram o seu plantio de feijão realizado quatro dias depois. Conseqüentemente, a porcentagem de palhada naqueles pontos é menor que nestes, já que o feijão está cobrindo mais o solo. E a porcentagem de solo em todos os pontos é baixa devido à presença da cobertura do solo com palhada.

Com isso, a resposta espectral da cultura do feijão nas imagens de satélite obtida no período de início da cultura mostrará influência, principalmente da palhada na curva espectral da cultura, e a influência do solo será pouco significativa. Concordando com Formaggio (1989), que relatou que na primeira fase da cultura ocorre o domínio do solo ou palhada nas interações com a radiação eletromagnética pelo fato da cultura recobrir pouca porcentagem da superfície do solo. Sanches et al. (2005) verificaram que quando as culturas de soja, cana-de-açúcar e milho estão em início de crescimento, a identificação das mesmas em imagens de satélite é bastante difícil, pois a resposta espectral desses alvos é muito influenciada pelo solo. O mesmo é observado após a colheita das culturas, quando o solo volta a aumentar sua influência no comportamento espectral.

Nas fotografias verticais obtidas no dia 09/12/2008, nos mesmos pontos amostrais, ou seja, 19 e 03, com 76 dias após o plantio, e 09 e 17, com 72 dias após o plantio do feijão, observou-se que não houve grande diferença entre a porcentagem de solo, palhada e de feijão nesses pontos amostrais, pois a cultura já se encontrava mais desenvolvida e com distribuição mais homogênea no pivô central estudado. A quantificação de área de feijão, palhada e solo dessas fotografias verticais encontram-se apresentadas nas tabelas 6 e 7.

Na tabela 6 encontram-se os dados de valores de cobertura de feijão, solo e palhada correspondentes aos pontos amostrais com 76 dias de plantio do feijão. A variação da porcentagem de feijão foi de para 18,06% nos 15 pontos amostrais (entre 70,07% - ponto 20 e 88,67% - ponto 03). A maioria dos pontos analisados foi encontrado com área maior que 0,75 m² de feijão por área amostral, indicando uma homogeneidade no crescimento da cultura. O ponto 22 apresentou o valor menor de área ocupada por feijão 9 (0,7007m²), provavelmente devido às conseqüências do efeito de borda de pivô. Devido ao crescimento do feijão, a porcentagem de palhada e de solo destes pontos foi baixa, apresentando valor máximo de 14,88% de palhada (ponto 10) e 14,99% de solo (ponto 20).

Os dados de porcentagem de feijão, palhada e solo dos pontos amostrais fotografados com 72 dias de plantio encontram-se na tabela 7. Nesta fase de desenvolvimento fenológico da cultura do feijão não foi verificado diferença na porcentagem de área ocupada pelo feijão em relação aos valores dos pontos amostrais da cultura que foram plantadas 4 dias antes destes. A variação da quantidade de feijão nesses pontos foi de 14,80% (78,67% - ponto 26 entre 93,47% - ponto 08), apresentado valores de cobertura de feijão por área amostral maior que os pontos amostrais da cultura com 76 dias de plantio (Tabela 6), indicando um aumento de área ocupada pela cultura e uma alta homogeneidade. Com isso as áreas ocupadas pela palhada e pelo solo foram pequenas, tendo um valor mínimo de 0,0048 m² (ponto 01) para a palhada e 0,0253 m² (ponto 08) para o solo por área amostral.

Tabela 6. Área em metros quadrados (m²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 24/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 09/12/2008.

Ponto 2			Ponto 3		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,7993	79,93	Feijão	0,8867	88,67
Palhada	0,0508	5,08	Palhada	0,6870	6,87
Solo	0,1499	14,99	Solo	0,0446	4,46
Ponto 10			Ponto 11		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,7507	75,07	Feijão	0,8226	82,26
Palhada	0,1488	14,88	Palhada	0,0762	7,62
Solo	0,1006	10,06	Solo	0,1012	10,12
Ponto 12			Ponto 13		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,8568	85,68	Feijão	0,8575	85,75
Palhada	0,0694	6,94	Palhada	0,0287	2,87
Solo	0,0738	7,38	Solo	0,1138	11,38
Ponto 14			Ponto 19		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,8009	80,09	Feijão	0,7799	77,99
Palhada	0,0991	9,91	Palhada	0,1107	11,07
Solo	0,1000	10,00	Solo	0,1094	10,94
Ponto 20			Ponto 21		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,8010	80,10	Feijão	0,7900	79,00
Palhada	0,0491	4,91	Palhada	0,1207	12,07
Solo	0,1499	14,99	Solo	0,0993	9,93
Ponto 22			Ponto 23		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,7007	70,07	Feijão	0,8052	80,52
Palhada	0,1564	15,64	Palhada	0,0739	7,39
Solo	0,1429	14,29	Solo	0,1209	12,09
Ponto 24			Ponto 27		
	Área (m ²)	Área (%)		Área (m ²)	Área (%)
Feijão	0,8040	80,40	Feijão	0,7523	75,23
Palhada	0,0905	9,05	Palhada	0,1381	13,81
Solo	0,1055	10,55	Solo	0,1096	10,96
Ponto 28					
	Área (m ²)	Área (%)			
Feijão	0,8604	86,04			
Palhada	0,1192	11,92			
Solo	0,0204	2,04			

Tabela 7. Área em metros quadrados (m²) e porcentagem (%) de feijão, palhada e solo para os pontos que tiveram o plantio realizado no dia 28/09/2008. As fotografias verticais utilizadas para os cálculos das áreas foram tiradas no dia 09/12/2008.

<u>Ponto 1</u>			<u>Ponto 4</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8711	87,11	Feijão	0,8974	89,74
Palhada	0,0048	0,48	Palhada	0,6480	6,48
Solo	0,1241	12,41	Solo	0,3780	3,78
<u>Ponto 5</u>			<u>Ponto 6</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8320	83,20	Feijão	0,8407	84,07
Palhada	0,9840	9,84	Palhada	0,5420	5,42
Solo	0,6960	6,96	Solo	0,1051	10,51
<u>Ponto 7</u>			<u>Ponto 8</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8754	87,54	Feijão	0,9347	93,47
Palhada	0,4150	4,15	Palhada	0,0400	4,00
Solo	0,8310	8,31	Solo	0,0253	2,53
<u>Ponto 09</u>			<u>Ponto 15</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8986	89,86	Feijão	0,8896	88,96
Palhada	0,7270	7,27	Palhada	0,0709	7,09
Solo	0,2870	2,87	Solo	0,0395	3,95
<u>Ponto 16</u>			<u>Ponto 17</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8677	86,77	Feijão	0,8277	82,77
Palhada	0,0300	3,00	Palhada	0,1084	10,84
Solo	0,1023	10,23	Solo	0,0639	6,39
<u>Ponto 18</u>			<u>Ponto 25</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,8514	85,14	Feijão	0,7934	79,34
Palhada	0,9240	9,24	Palhada	0,1013	10,13
Solo	0,5620	5,62	Solo	0,1053	10,53
<u>Ponto 26</u>			<u>Ponto 29</u>		
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>		<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>
Feijão	0,7867	78,67	Feijão	0,8442	84,42
Palhada	0,8840	8,84	Palhada	0,0537	5,37
Solo	0,1249	12,49	Solo	0,1021	10,21
<u>Ponto 30</u>					
	<u>Área (m²)</u>	<u>Área (%)</u>			
Feijão	0,8398	83,98			
Palhada	0,8520	8,52			
Solo	0,7500	7,50			

No dia 09/12/2008 fotografou-se novamente os 30 pontos da matriz referencial, e na figura 15 estão apresentadas as fotografias verticais obtidas dos pontos de controle 09 e 17 (72 dias de plantio do feijão) e 03 e 19 (76 dias de plantio do feijão). As figuras 16, 17, 18 e 19 mostram as “cartas de cobertura” provenientes dos resultados da classificação supervisionada nestes quatro pontos de controle.

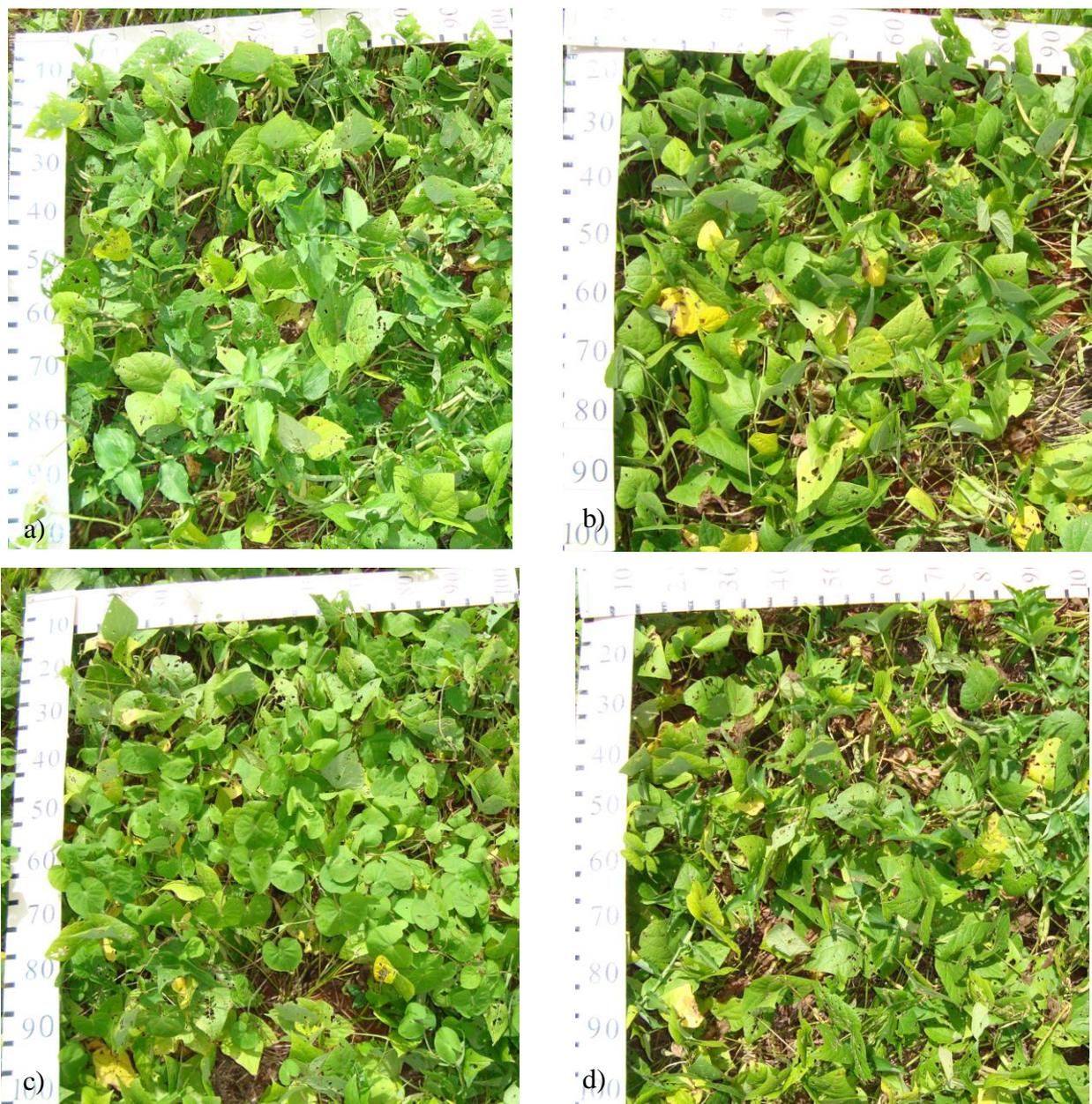
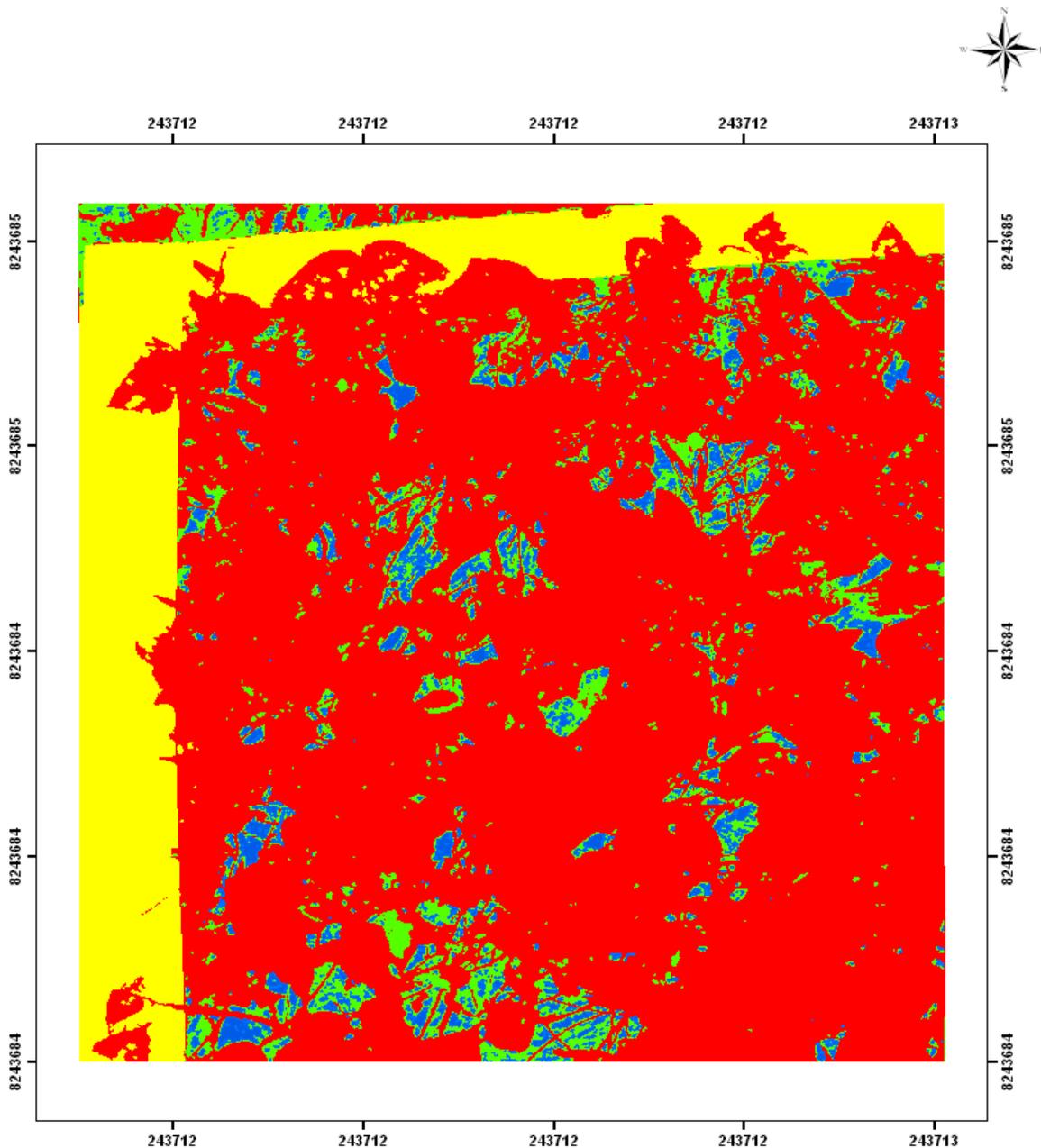


Figura 15. Fotografias verticais dos pontos 09 (a) e 17 (b) (com plantio realizado no dia 28/09/2008); 03 (c) e 19 (d) (com plantio realizado no dia 24/09/2008). As fotografias foram tiradas no dia 09/12/2008.



**Ponto 09
Legenda**

- Régua
- Feijão (89,86%)
- Palhada (7,27%)
- Solo (2,87%)

Projeção: UTM
Datum: SAD 69
Fuso: 23 S



Figura 16. Classificação supervisionada do ponto 09, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).

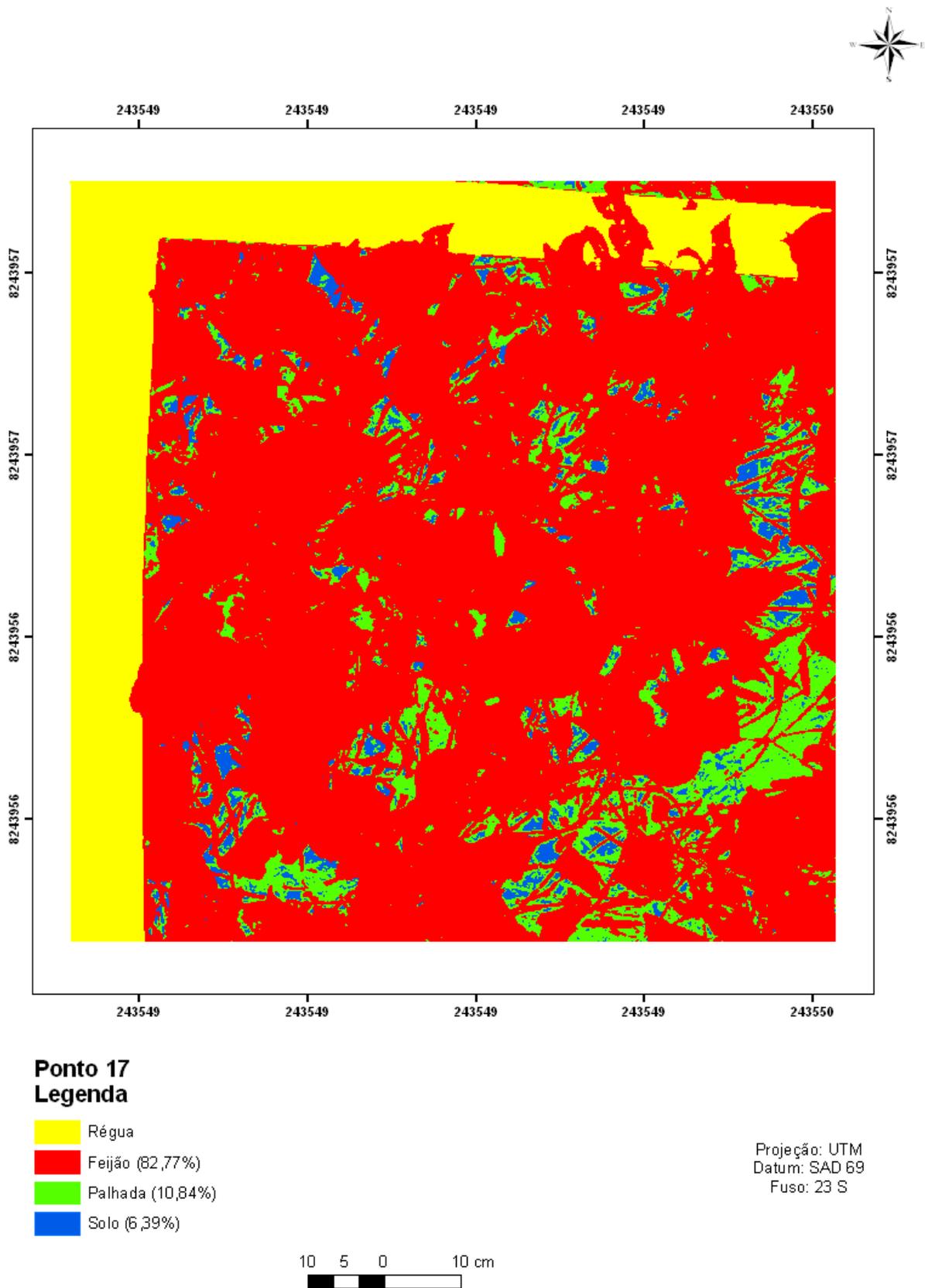


Figura 17. Classificação supervisionada do ponto 17, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).

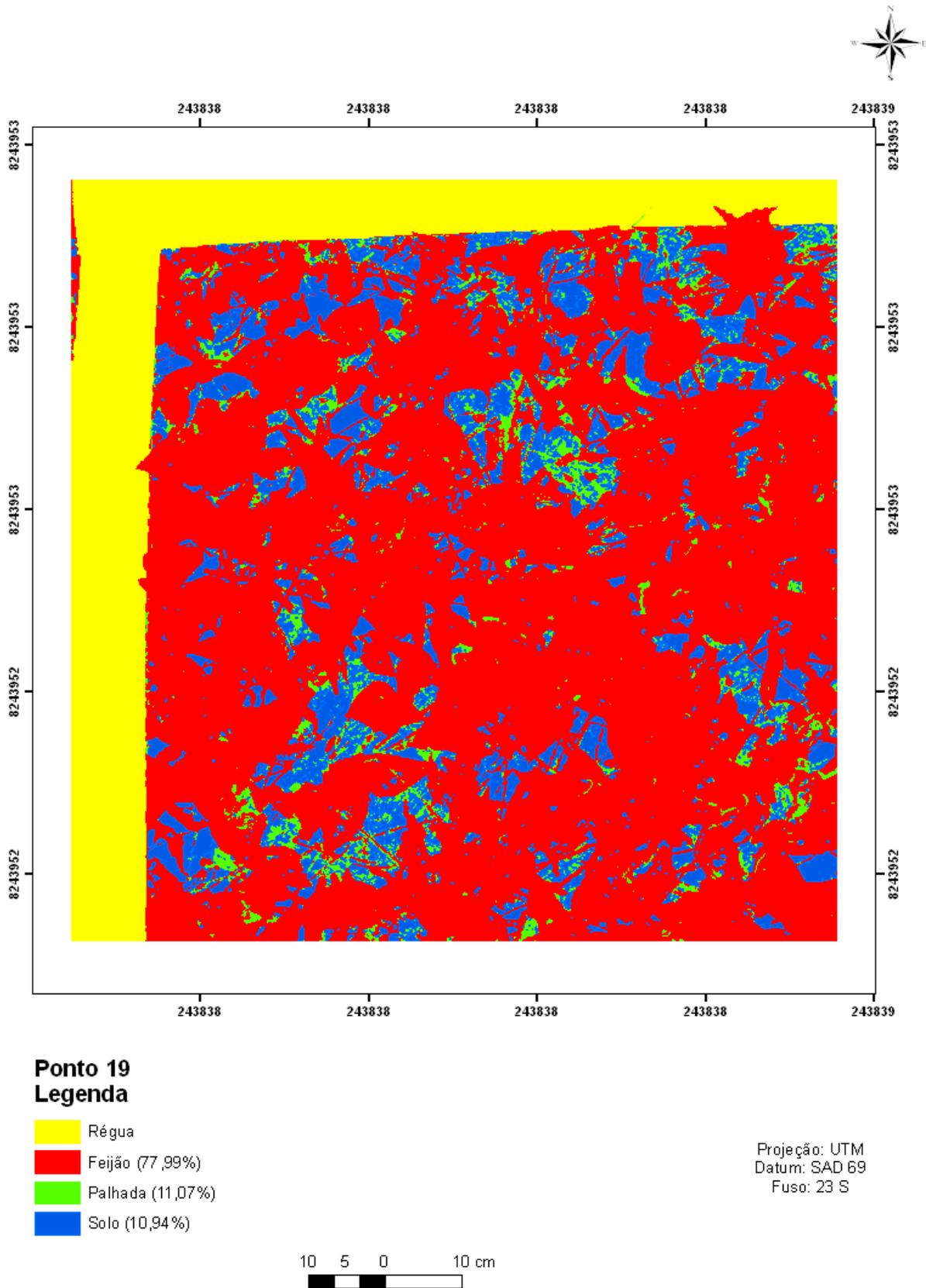


Figura 18. Classificação supervisionada do ponto 19, fotografado no dia 09/12/2008 (76 dias após o plantio).

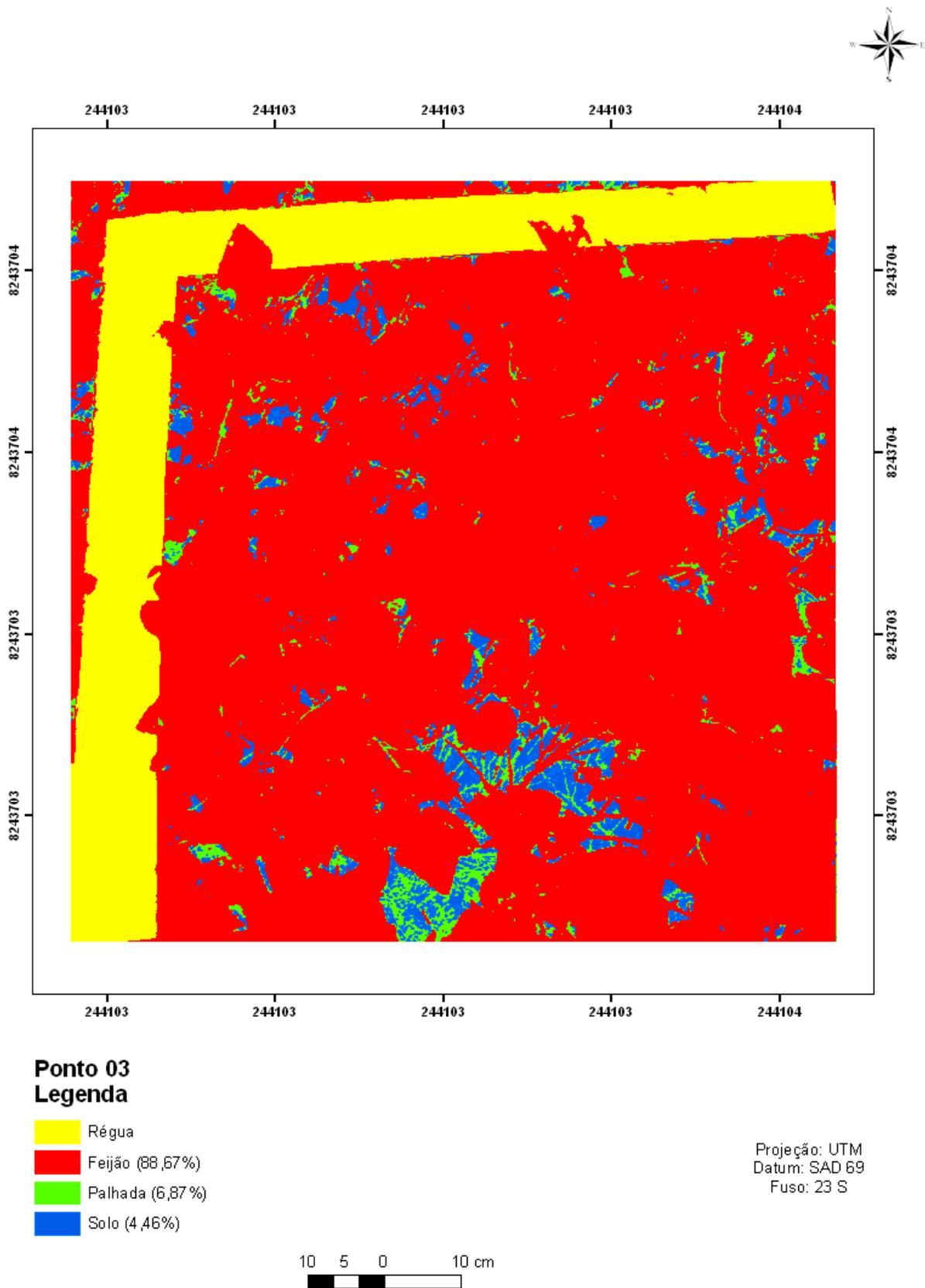


Figura 19. Classificação supervisionada do ponto 03, fotografado no dia 09/12/2008 (72 dias após o plantio).

Observa-se nas figuras 16, 17, 18 e 19 que todos os pontos amostrais, independentemente de quando foi feito o plantio, apresentaram área ocupada por feijão maior que $0,77 \text{ m}^2$, mostrando que praticamente não há diferença de cobertura da cultura entre os pontos amostrais estudados. A porcentagem de palhada é baixa ($< 12\%$), provavelmente, pelo fato de já ter sofrido processo de decomposição; já a porcentagem de solo encontra-se acima de $0,10 \text{ m}^2$ apenas no ponto 19 e nos demais pontos, a ocupação do solo é baixa, devido ao crescimento homogêneo da cultura do feijão.

Assim, nas imagens de satélite correspondentes ao período em que a cultura está no seu máximo desenvolvimento, na análise da curva espectral da mesma não haverá influência significativa da palhada e nem do solo, já que a cobertura da cultura predomina tal como foi observado por Sanches et al (2005). Esses autores observaram que à medida que as plantas crescem, diminui a influência do solo e crescem as possibilidades de identificação das culturas, uma vez que aumenta a influência das características específicas de cada tipo de planta.

Benvenuti (2005) relatou que a resposta espectral da cana-de-açúcar é influenciada conjuntamente pelas mudanças no dossel da cultura e pelas condições climáticas. As alterações espectrais que ocorrem nas características do dossel dos canaviais são causadas, entre outros fatores, pela diminuição da quantidade de plantas/metro e o aumento da quantidade de folhas mortas (palha), influenciando assim, na resposta espectral desta cultura, já que as influências mais significativas são das folhas mortas (palhada).

De acordo com vários autores (Jackson e Pinter, 1986; Jackson et al., 1990 e Formaggio et al., 1995) que consideram a densidade do plantio e os solos como um dos principais influenciadores na resposta espectral dos dosséis vegetais, observa-se que, quando a cultura encontra-se em sua segunda fase fenológica ocorre o total domínio da cobertura verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética (Formaggio, 1989), não havendo assim influência significativa dos solos nem da palhada na resposta espectral da cultura do feijão estudada.

Assim, como o solo não apresenta interferência significativa na cultura do feijão em estudo, a homogeneidade na cor de Munsell e as pequenas variações da textura e teores de matéria orgânica detectados para o solo da área do pivô central estudado, não influenciaram no padrão de resposta espectral do feijoeiro avaliado.

III. 3. Determinação da curva espectral da cultura do feijão

III. 3. 1. Determinação da curva espectral por meio de espectrorradiômetro

Na figura 20 pode-se observar as curvas espectrais do solo, palhada e folhas de feijão analisadas pelo espectrorradiômetro a partir do dia 28/10/2008 e na figura 21 observam-se as curvas espectrais da folha de feijão analisadas a partir do dia 09/12/2008.

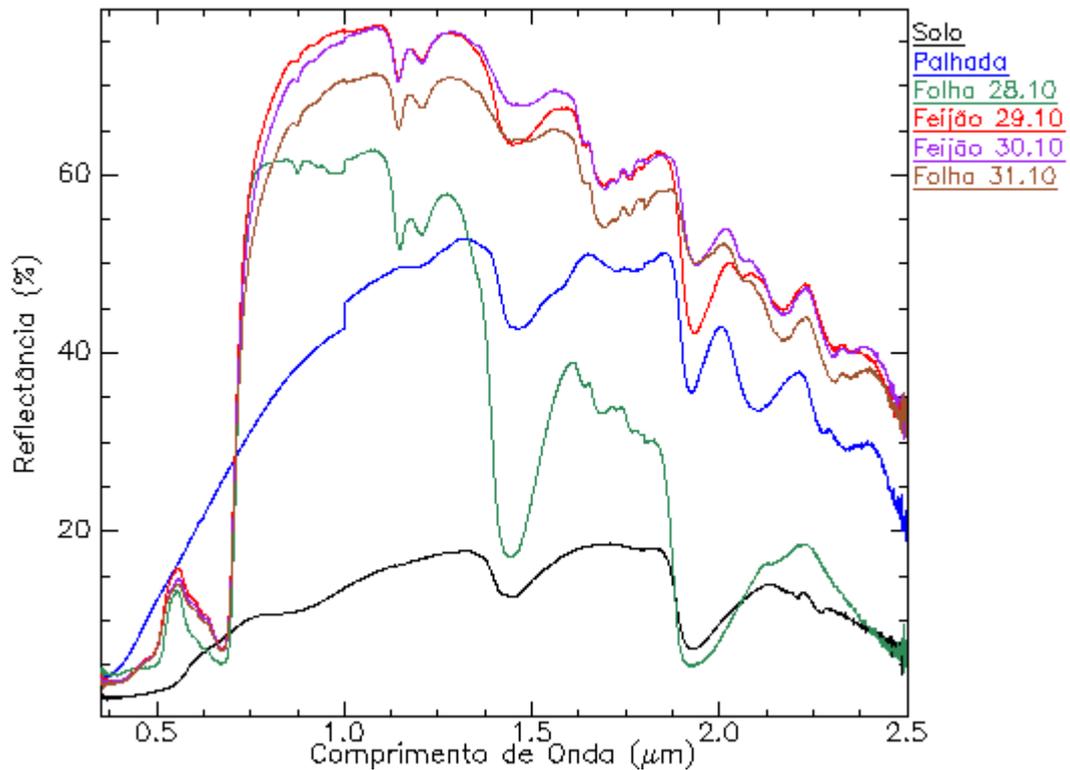


Figura 20. Curvas espectrais do solo, palhada e folhas de feijão, obtidas pelo sensor hiperespectral, FieldSpec®3 a partir do dia 28/10/2008.

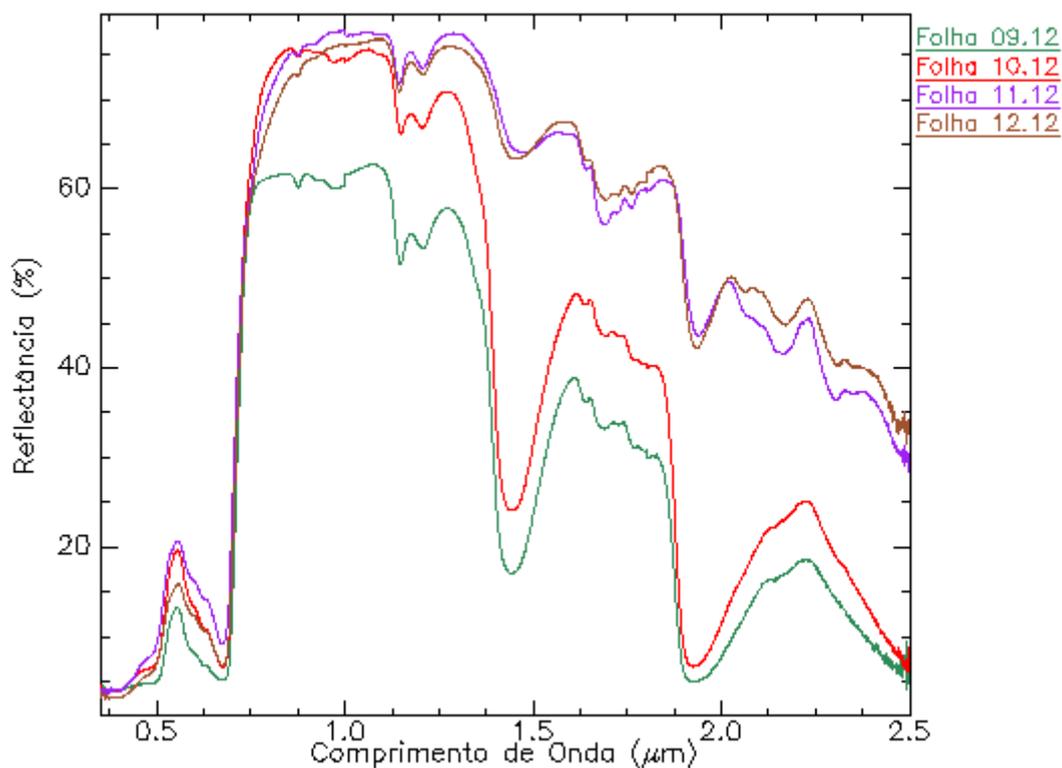


Figura 21. Curvas espectrais da folha de feijão obtidas pelo sensor hiperespectral, FieldSpec®3 a partir do dia 09/12/2008.

Pelas figuras 20 e 21, observou-se que no comprimento de onda do infravermelho de ondas curtas (SWIR; 1,3 a 2,5 μm), o espectro da folha de feijão verde avaliada no dia 09/12/2008 apresenta feições significativas de absorção da água da estrutura celular das folhas. As principais bandas de absorção, que podem ser analisadas, ocorrem em comprimentos de onda de 1,44 μm e 1,91 μm , concordando com Castro Junior (2001). Ao analisar as demais folhas de feijão (10/12; 11/12; 12/12), que estão em processo de senescência, verificou-se uma redução na absorção de água, devido a sua perda estrutural.

Verificou-se, também, que a radiação refletida pelas folhas em senescência, na região do visível foi maior do que aquela da folha verde, resultado também encontrado por Göergen et al. (2009). Esta maior reflectância é resultado da menor absorção, que é consequência da degradação dos pigmentos (clorofilas) responsáveis pela absorção da energia solar; concordando com Carvalho Junior et al. (2005) e Moreira (2003) que relataram que ocorre uma redução no teor de clorofilas com diminuição da expressão das bandas de absorção no intervalo entre 0,45 e 0,65 μm , quando a folha entra em processo de senescência. Gausman (1985) comentou que a energia refletida pelas folhas é afetada, entre outros fatores, pelo conteúdo de água e a senescência com a diminuição de clorofila e aumento de melanoproteínas e carotenóides. Segundo Knipling (1970), esses fatores influenciam nas

propriedades espectrais das folhas, aumentando ou diminuindo a sua reflectância e modificam os padrões de reflectância ou resposta espectral registrados pelos sensores remotos, que representam a integração destes efeitos. Desta forma, nas folhas de feijão observadas, ocorre simultaneamente, um aumento da reflectância nas curvas espectrais correspondentes às folhas em estado de senescência, em relação à curva espectral da folha verde.

III. 3. 2. Determinação da curva espectral do feijão por meio do sensor ASTER

Após a reamostragem das curvas espectrais obtidas pelo espectroradiômetro para a resolução espectral do sensor ASTER, observou-se que a resposta espectral da folha verde de feijão do início da cultura (28/10/2008) é igual à da folha verde de feijão no final da cultura (09/12/2008) (Figura 22). Esta constatação também pode ser feita pelas curvas espectrais das folhas verdes, obtidas no dia da coleta das mesmas pelo espectroradiômetro, TAM como mostra as figuras 20 e 21. Tal fato discorda de autores como Böhmer et al. (2007) e Almeida et al. (2004), que relatam que há alterações nas curvas de reflectância de uma cultura causadas pelas diferenças no seu crescimento e desenvolvimento. Gausman (1985) afirma que os diferentes estágios de maturação de uma folha influenciam na sua propriedade espectral, aumentando ou diminuindo a sua reflectância. Estas observações não condizem com o observado neste trabalho, já que não houve diferença de reflectância entre as folhas verdes de feijão em estágios fenológicos distintos.

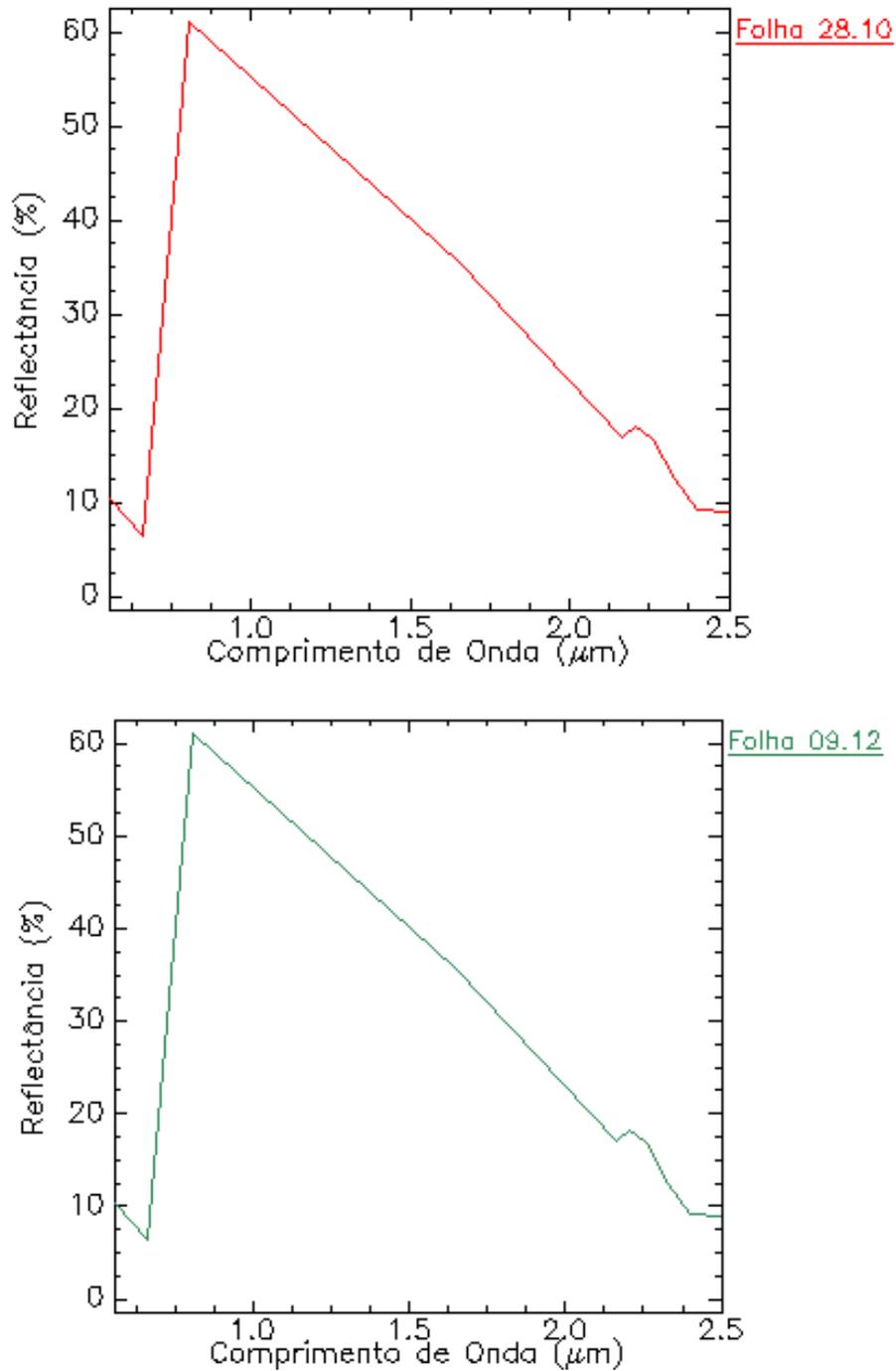


Figura 22. Comparação de duas curvas espectrais, reamostradas para o sensor ASTER, em diferentes estágios fenológicos.

O estudo realizado por meio de fotografias digitais verticais representativas da cultura do feijão em diferentes estágios fenológicos, permitiu constatar que as proporções de cobertura do solo e da palhada variam significativamente e proporcionalmente interferem nas respostas espectrais da cultura do feijão, avaliadas por meio de imagens de satélite. Assim, apesar das respostas espectrais reamostradas ao sensor ASTER serem praticamente iguais

para os estágios fenológicos avaliados, ao extrair a curva espectral de uma cultura por meio de imagens de satélite, deve-se ter o cuidado de fazer este procedimento no estágio de maior desenvolvimento da cultura, minimizando interferências do solo e da palhada associados.

III. 4. Classificação espectral da imagem de satélite do sensor ASTER

III. 4. 1. Método SAM (Spectral Angle Mapper)

III. 4. 1. 1. Núcleo Rural Jardim, Distrito Federal

A metodologia SAM mede a similaridade entre as curvas espectrais da imagem de satélite do sensor ASTER com as curvas espectrais obtidas em laboratório pelo sensor hiperespectral FieldSpec®3 (Kruse et al., 1993). O resultado da classificação pelo método SAM, por meio dos *endmembers* obtidos pelas curvas espectrais do solo, palhada e folhas de feijão extraídas pelo espectroradiômetro, pode ser observada pela figura 23. As curvas espectrais (*endmembers*) utilizadas nesta classificação e suas respectivas cores foram: solo - vermelho, palhada - amarela e folhas de feijão dos dias 28, 29, 30 e 31/10/2008 - verde, azul, roxo e ciano, respectivamente.

Os ângulos utilizados para verificar a similaridade das curvas espectrais foram: 0,25 e 0,30 radianos, que segundo Costa Filho et al. (2007), quanto menor o ângulo, maior será a similaridade entre as curvas espectrais. Ambos os ângulos, classificaram corretamente a cultura do feijão no pivô nº 4 (coloração verde), diferenciando dos demais pivôs (coloração preta) que não eram feijão, ou seja estavam sendo cultivados com outra cultura (Figura 23).

Na classificação SAM, realizada com o menor ângulo (0,25 radianos) alguns pivôs não foram classificados, ficando com número digital de *pixel* igual a zero, apresentando-se na imagem classificada com coloração preta, pelo fato de não haver a curva espectral correspondente destas culturas entre os *endmembers* utilizados, já que se utilizou apenas as curvas espectrais de feijão coletadas pelo espectroradiômetro. Na classificação SAM com ângulo maior (0,30 radianos), também, não houve a classificação de alguns pivôs, além disso, houve a classificação de dois pivôs como sendo de feijão em processo de senescência, observados na coloração azul, e pelos *endmembers* utilizados, a coloração azul é referente a folha de feijão do dia 29/10/2008. Este resultado é compatível com a afirmação de Costa Filho et al. (2004), já que ao aumentar o ângulo da classificação SAM (0,30 radianos) houve uma diminuição na similaridade entre as curvas espectrais, ocasionando uma classificação diferente daquela realizada com um ângulo menor (0,25 radianos).

Observa-se na figura 23 o predomínio da coloração amarela, indicando que toda a área é ocupada por palhada, não havendo distinção, nesta classificação, quanto aos ângulos

utilizados. Assim, esta classificação SAM não distinguiu a palhada de áreas com solo exposto, tendo como maior similaridade a curva espectral da palhada. Tal fato é justificado pelo predomínio de cultivos sob sistema de plantio direto no Núcleo Rural estudado e a época da obtenção da imagem ASTER utilizada neste trabalho que coincide com o período de seca, sendo assim, grande parte da área cultivável poderia estar recoberta por palhada, com exceção das áreas submetidas à irrigação por sistema de pivô central. A metodologia não foi eficiente na individualização de áreas com solos expostos.

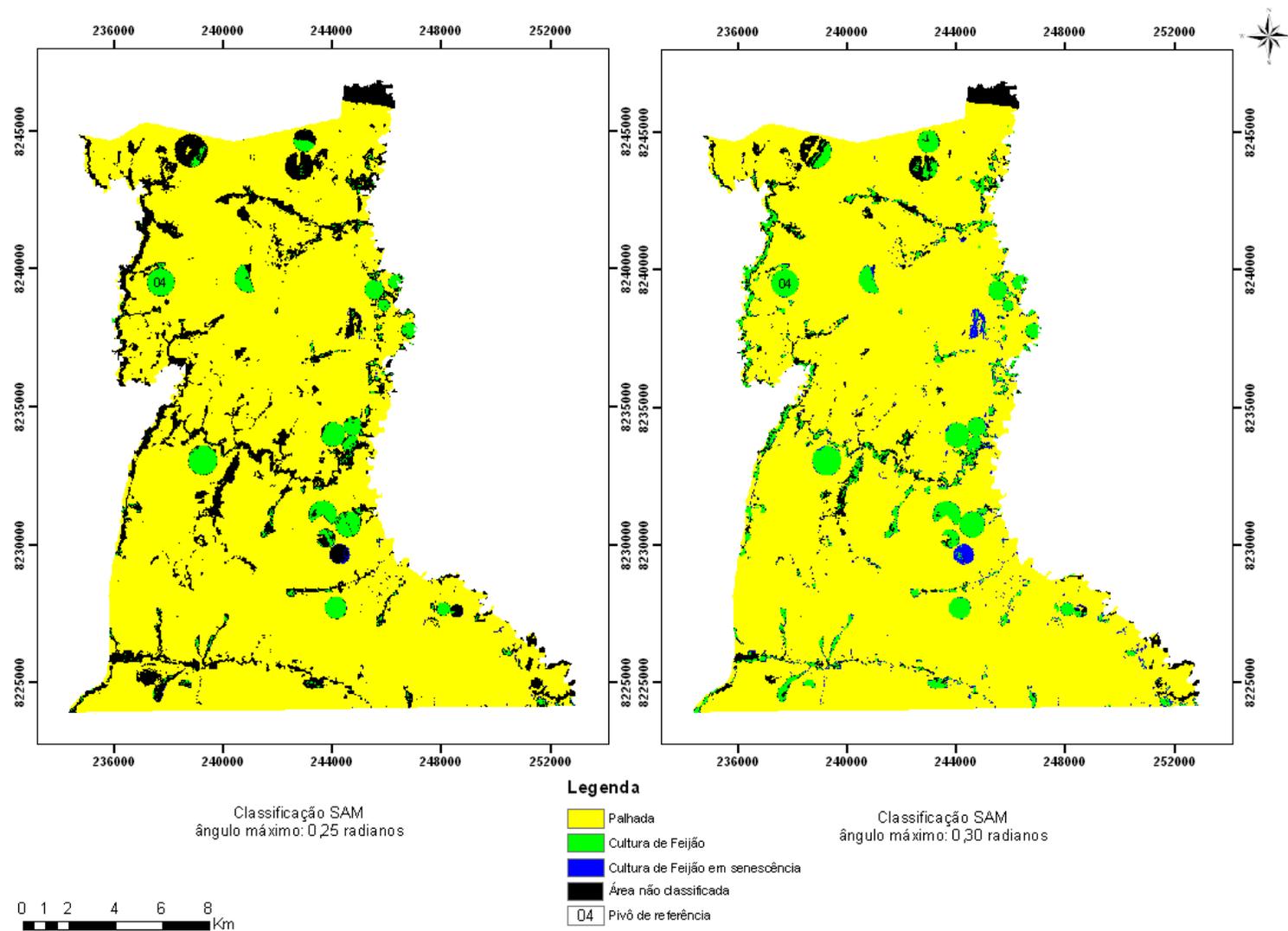


Figura 23. Resultado da classificação Spectral Angle Mapper (SAM) do Núcleo Rural Jardim - DF, utilizando dois ângulos (0,25 e 0,30 radianos).

III. 4. 1. 2. Cristalina, Goiás

Para verificar distinção na classificação da cultura de feijão com outras culturas pelo método SAM, foi realizada a classificação SAM na área com ocorrência de pivôs centrais com cultura permanente e de porte alto, localizados no município de Cristalina. Nesta área, também, foi feita a classificação SAM com os dois ângulos (0,25 e 0,30 radianos) e com as mesmas curvas espectrais utilizadas na área do Núcleo Rural Jardim – DF (Figura 24).

Na classificação realizada com o ângulo de 0,25 radianos observou-se que as áreas sob pivô central com cultura permanente não foram classificadas como sendo de cultura do feijão, pois não havia o espectro desta cultura nas curvas espectrais utilizadas. Na classificação com o ângulo maior (0,30 radianos), os pivôs com culturas diferentes de feijão, foram erroneamente identificados como pivôs de feijão em processo de senescência, já que foram classificados com a coloração azul, referentes ao *endmembers* utilizado, correspondente à folha de feijão do dia 29.10.2008. Essa variação nas classificações espectrais realizadas, concordam, novamente com Costa e Filho et al. (2004), pois o aumento do ângulo proporcionou uma diminuição na similaridade dos espectros, por isso que estes pivôs não foram corretamente classificados.

Observa-se na classificação SAM apresentada na figura 24, tal como na classificação SAM da área do Núcleo Rural Jardim (Figura 23) o predomínio da coloração amarela, indicando que toda a área é ocupada por palhada, não havendo distinção, nesta classificação, quanto aos ângulos utilizados. Verificou-se que houve uma confusão com outro alvo já que o método SAM, não distinguiu a palhada de áreas como solo exposto, tendo como maior similaridade a curva espectral da palhada tal como discutido para o Núcleo Rural Jardim.

Assim como Moreira e Galvão (2009), observou-se, neste trabalho, uma boa capacidade de identificação espectral com a técnica SAM, possibilitando assim o mapeamento adequado de alvos com diferentes curvas espectrais, com boa precisão de classificação.

A maior utilidade prática na identificação e classificação digital de pivôs de feijão, por meio do método de classificação SAM, está na sua aplicação para isolar estas áreas agrícolas visando o seu monitoramento, a partir das curvas espectrais desta cultura. Na classificação SAM, o ângulo de 0,25 radianos apresentou melhores resultados na identificação da cultura do feijão, quando comparado com o ângulo 0,30.

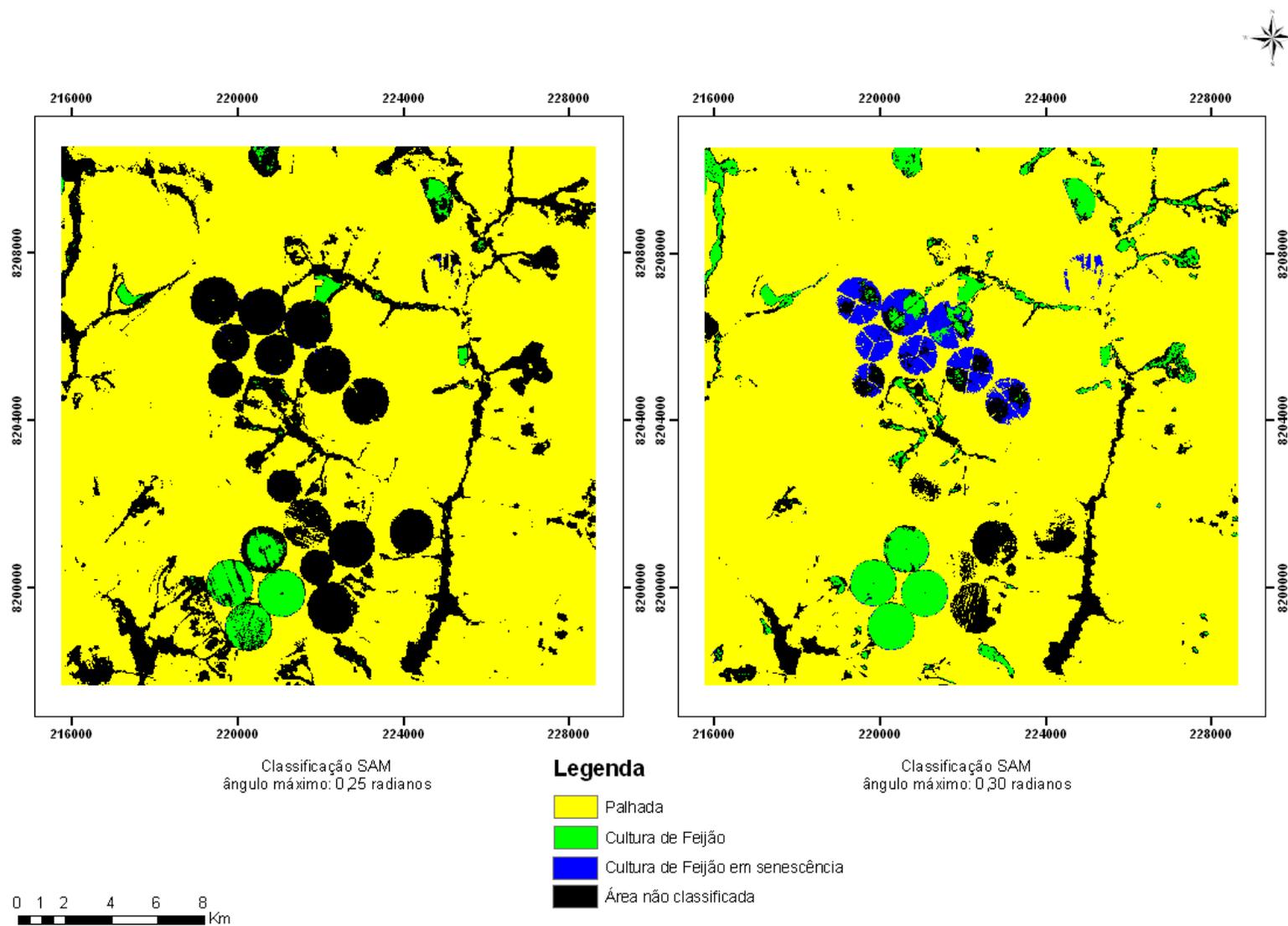


Figura 24. Resultado da classificação Spectral Angle Mapper (SAM) da área estudada no município de Cristalina - GO, utilizando dois ângulos (0,25 e 0,30 radianos).

III. 4. 2. Método MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral)

III. 4. 2. 1. Núcleo Rural Jardim, Distrito Federal

O método de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) modela as curvas espectrais que estão misturadas na imagem ASTER por meio de uma combinação linear das curvas espectrais puras obtidas em laboratório pelo sensor hiperespectral FieldSpec®3 (Silva et al., 2008). O resultado da classificação MLME na área do Núcleo Rural Jardim pode ser observado na imagem classificada apresentada na figura 25. As curvas espectrais (*endmembers*) utilizadas nesta classificação e suas respectivas cores foram: solo - vermelho, palhada - amarela e folhas de feijão dos dias 28, 29, 30 e 31/10/2008 - verde, azul, roxo e ciano, respectivamente.

Após fazer a classificação MLME, realizou-se a composição colorida RGB (Figura 25) com a seguinte distribuição: Red - solo; Green - palhada e Blue – feijão (curva espectral obtida em 28.10.2008). Com isso, os pivôs com cobertura de cultura do feijão no seu máximo vigor foram classificados com a coloração azul. Verificou-se que a cultura do feijão no pivô nº 4 obteve esta coloração, tendo sido classificado corretamente por intermédio deste método de classificação.

Pelo fato do modelo linear representar as variações encontradas nas assinaturas espectrais de diversos materiais e com isso realizar a proporção dos *endmembers* contidos em cada pixel da imagem, o resultado da classificação contém uma mistura da composição colorida realizada (Detchmendy e Pace, 1972 e Aguiar et al. 1999). Os pivôs que foram classificados com a coloração ciano (azul + verde), são aqueles que estavam no início da cultura, porém, com maior proporção de interferência da palhada na resposta espectral, tal como o pivô de nº 11. Pelo anexo 1, observou-se que a data da obtenção da imagem ASTER utilizada no estudo coincidiu com a época do início do plantio do feijão neste pivô central, por isso encontra-se uma alta presença da palhada misturada com a cultura ainda em fase de desenvolvimento.

Observou-se, também, que na metade superior do Núcleo Rural Jardim prevalece a coloração verde na área, representando áreas cultiváveis sob o sistema de plantio direto. Já na parte inferior do Núcleo Rural Jardim ocorre maior presença de solo exposto, correspondente a uma coloração mais avermelhada da área, indicando ocorrência de áreas cultiváveis sob sistema de plantio convencional.

A distinção entre alvos agrícolas por meio de bandas convencionais dos sensores orbitais ópticos é difícil, assim, a aplicação de MLME apresenta-se como uma alternativa na realização de tal discriminação, concordando com Mello et al. (2009) que discriminaram as

fitofisionomias do Cerrado no Parque Nacional de Brasília, por meio da classificação MLME buscando assim definir meios de facilitar a discriminação das mesmas usando ferramentas do sensoriamento remoto. Assim como no trabalho realizado por Ferreira (2003) que pesquisou a aplicação do modelo linear de mistura espectral para a discriminação das principais fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado), utilizando dados obtidos pelo sensor Landsat ETM⁺, a fim de elaborar um novo mapa de vegetação desse Parque por intermédio da definição de um conjunto apropriado de *endmembers*. Percebe-se que este método de classificação apresenta um bom desempenho na distinção de alvos devido a análise de forma “suave” e precisa na escala de subpixel.

Com o objetivo de realçar os alvos de interesse foi feito um novo processamento digital com a classificação MLME, utilizando-se a classificação não-supervisionada Isodata, representada na figura 25. A classificação Isodata gerou 6 classes em toda a cena, destas, 5 encontram-se no Núcleo Rural Jardim e representam os seguintes alvos:

- Azul e Verde: cultura de feijão
- Ciano: Mata Galeria e outras culturas;
- Magenta: solo exposto; e
- Amarelo: palhada e outras culturas.

Observou-se que o alvo da cultura do feijão foi classificado corretamente, já os demais alvos tiveram confusões de classificação, pois alvos completamente diferentes foram agrupados em uma mesma classe. Devido a estas confusões, a classificação não supervisionada Isodata apresentou bons resultados apenas na individualização dos pivôs com cultura de feijão, não sendo satisfatória para os demais alvos.

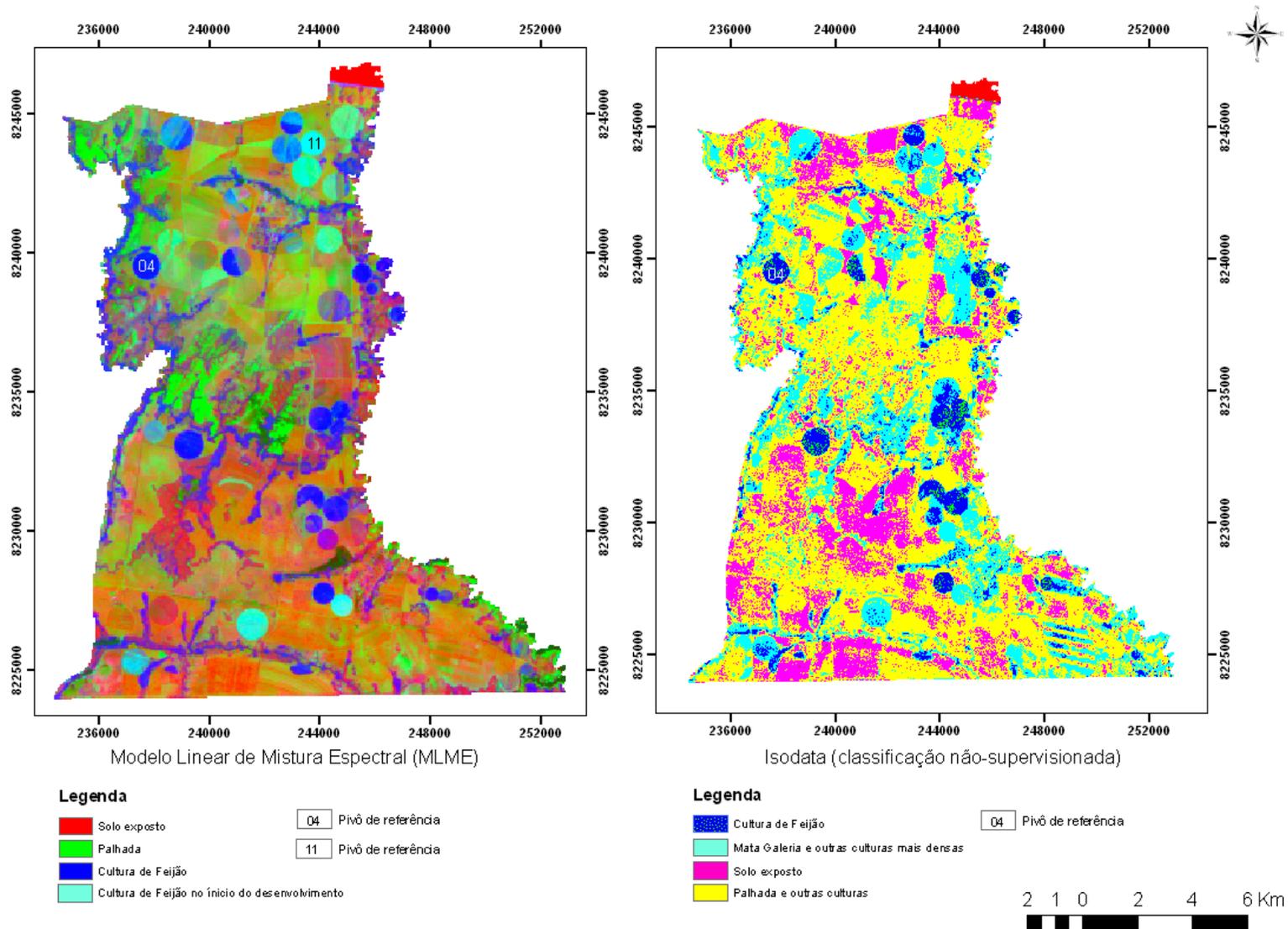


Figura 25. Imagem classificada pelo Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e Isodata (classificação não-supervisionada) do Núcleo Rural Jardim – DF.

III. 4. 2. 2. Cristalina, Goiás

Para verificar a diferença entre a classificação do feijão e de outras culturas, classificou-se por meio do MLME a mesma área estudada para classificação SAM no município de Cristalina e o seu resultado está apresentado na figura 26.

Os processamentos digitais realizados na imagem na classificação MLME foram os mesmos da classificação MLME do Núcleo Rural Jardim, onde os pivôs com a tonalidade azul representam a cultura do feijão. Os pivôs de cultura diferente de feijão (cultura permanente) foram classificados com a coloração roxa, diferenciando dos pivôs com cultura do feijão (Figura 26). Este resultado indica que a classificação MLME conseguiu distinguir os pivôs de cultura de feijão das demais culturas, sendo considerada, portanto, um bom método de mapeamento de culturas agrícolas.

Na classificação não-supervisionada Isodata gerada (Figura 26), também foram representadas apenas 5 classes que atingiram os mesmos alvos:

- Azul e Verde: cultura de feijão
- Ciano: Mata Galeria e outras culturas;
- Magenta: solo exposto; e
- Amarelo: palhada e outras culturas.

Verificou-se que os pivôs de cultura diferente de feijão (cultura permanente) foram classificados com uma coloração ciano e amarelo, diferentemente dos pivôs de feijão, que foram classificados com uma coloração azul. A classificação não supervisionada Isodata realizou com sucesso a distinção entre estas culturas, porém, assim como ocorreu na classificação Isodata do Núcleo Rural Jardim, houve confusões nas classificações dos demais alvos. Segundo Aguiar et al. (1999) na classificação convencional é comum ocorrer uma estimativa incorreta para algumas classes temáticas, devido à existência de *pixels* misturados, não representados por nenhuma das classes previamente definidas no processamento.

Durante o processamento da classificação do MLME houve a obtenção de uma imagem erro ou imagem RMSE (*Root Mean Square Error*), que tem como função principal indicar a qualidade dos *endmembers* utilizados no modelo. Na figura 27 estão apresentadas as imagens erro do Núcleo Rural Jardim e da área estudada no município de Cristalina. Segundo Silva et al. (2008), *pixels* escuros indicam baixo valor de erro, ou seja, *pixels* modelados corretamente, enquanto que *pixels* claros/brilhantes demonstram um valor mais alto de erro. Observou-se que os *pixels* do pivô de feijão n° 4 do Núcleo Rural Jardim está escuro, indicando que o *pixel* foi modelado corretamente. Já os *pixels* dos pivôs de cultura diferente

de feijão da área de estudo em Cristalina estão claros, demonstrando um alto valor erro, devido a ausência do *endmember* desta cultura na biblioteca espectral utilizada.

Com isso, a classificação por meio do Modelo Linear de Mistura Espectral apresentou resultados bastante satisfatórios, contribuindo para distinguir com uma boa precisão os pivôs com cultura de feijão das demais culturas, concordando com Maas (2000), já que a estimativa das áreas de plantio e de sua respectiva produtividade torna-se mais confiável. Considera-se a metodologia uma alternativa de uso para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos de áreas sob cultivo agrícola de feijão em imagens de satélite ASTER.

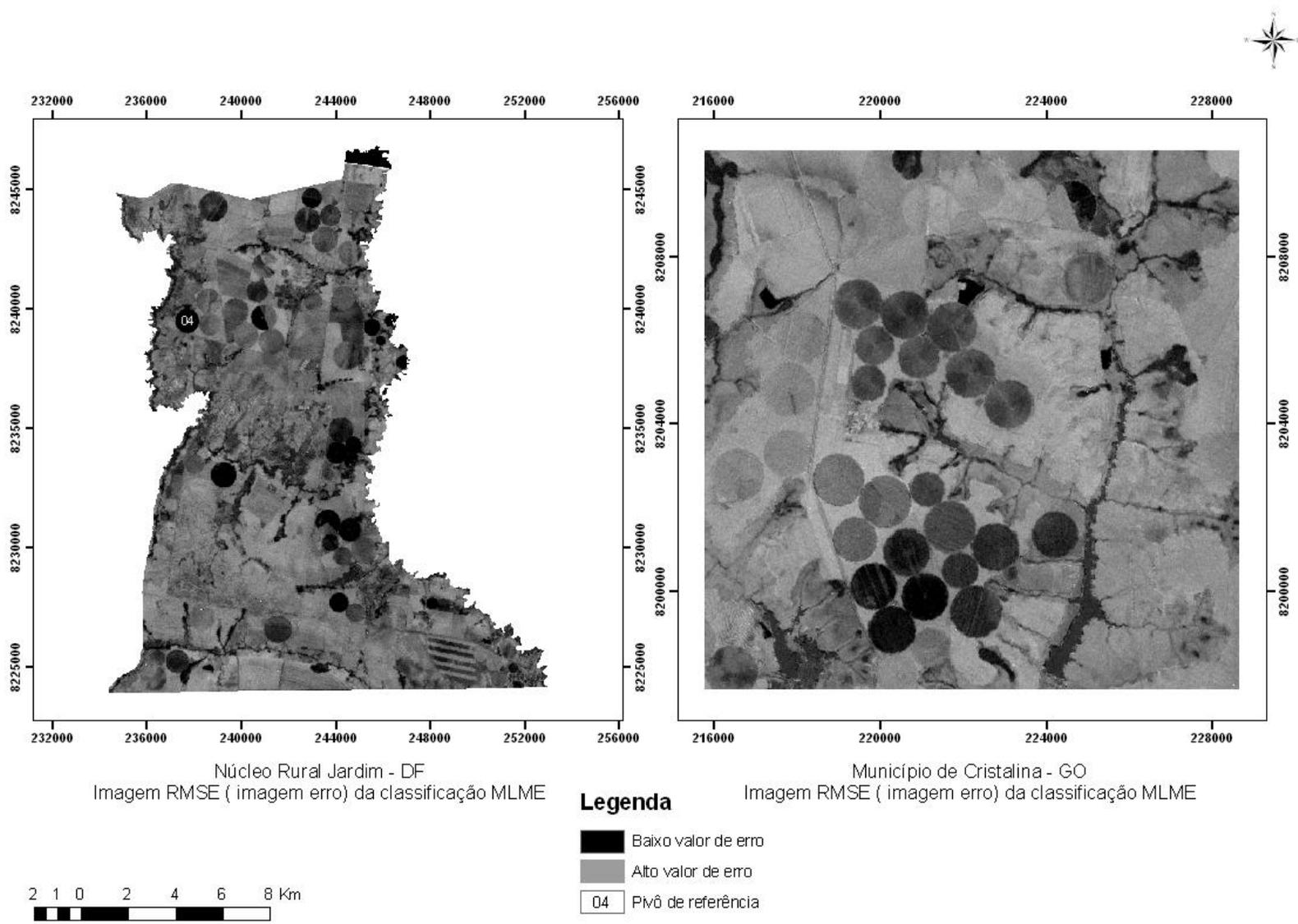


Figura 27. Imagem RMSE (imagem erro) do Núcleo Rural Jardim – DF e da área estudada no município de Cristalina – GO.

IV. CONCLUSÕES

1. Observou-se variações nas porcentagens de solo, palhada e principalmente de feijão nas fotografias digitais verticais obtidas no dia 24/10/2008 (30 e 26 dias após o plantio), apesar da pequena diferença na data de plantio, quatro dias. Não houve grande diferença entre a porcentagem de solo, palhada e de feijão nas fotografias verticais obtidas no dia 09/12/2008 (76 e 72 dias após o plantio), pois a cultura já se encontrava mais desenvolvida e com distribuição mais homogênea no pivô estudado.
2. A resposta espectral da cultura do feijão em imagens de satélite obtidas no período de início da cultura mostrou influência, principalmente da palhada na curva espectral da cultura, pelo fato da cultura do feijão estar no início do seu ciclo fenológico. Já a resposta espectral da cultura de feijão nas imagens de satélite correspondentes ao período em que a cultura está no seu máximo desenvolvimento não apresenta influência significativa da palhada e nem do solo, já que a cobertura da cultura é bastante elevada. Os solos, assim como seus atributos avaliados não mostraram interferência significativa na resposta espectral da cultura do feijão.
3. A classificação espectral por meio do método SAM (*Spectral Angle Mapper*) possibilitou a individualização adequada dos pivôs com cultura de feijão, porém ao aumentar o ângulo da classificação SAM (0,30 radianos) houve uma diminuição na similaridade entre as curvas espectrais, ocasionando uma classificação diferente daquela realizada com um ângulo menor (0,25 radianos). Além disso a classificação SAM não distinguiu a palhada de áreas com solo exposto.
4. A classificação espectral por meio do MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral) possibilitou a discriminação dos pivôs de cultura de feijão das demais culturas, apresentando-se como uma alternativa de uso para levantamentos, monitoramentos e mapeamentos de áreas sob cultivo agrícola de feijão em imagens de satélite ASTER.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J. B.; SABOL, D. E.; KAPOS, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A. R.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Classification of multispectral images based on fraction of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 52, p. 137-154, 1995.
- ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. In: IEE INT. GEOSCIENCE. AND REMOTE SENSING SYMP, 1., 1989, New York. **Proceedings...** IEEE: New York, p. 16-21, 1989.
- ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; JOHNSON, P. E. Spectral mixture modeling a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. **Journal Geophys, Res.**, v. 91, p. 8098-8112, 1986.
- AGUIAR, A. P. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; MASCARENHAS, N. D. A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.
- ALMEIDA, T. S.; FONTANA, D. C.; MARTORANO, L. G.; BERGAMASCHI, H. Influência do sistema de manejo na reflectância da cultura da soja. In: SIMPOSIO PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL, 11., 2004, Santiago. **Anais...** Santiago, Chile, 2004.
- ALVARENGA, B. S.; D´ARCO, E.; MOREIRA, M. M. ; RUDORFF, B. F. T. Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens para a estimativa de áreas de arroz irrigado: um estudo de caso no município de Santa Vitória do Palmar/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 3961-3966, 2005.
- ANGULO FILHO, R.; CUNHA, C. A. H.; RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. Comportamento espectral da cultura do feijão (IAC-Carioca 80) irrigado com diferentes lâminas de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. CD-Rom
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R.; PEDROSA, S. A. Relations between native vegetation and soil classes of Federal District, using ASTER Sensor. In: Congreso Geologico Argentino, 17., y Simpósio Internacional de la Teledeteccion

- en las Ciencias da Terra, 2., e Simpósio ASTER-GEOSAT, 2., 2008, San Salvador de Jujuy. **Anais...** San Salvador de Jujuy: Universidad Nacional de Jujuy, 2008.
- BARNES, E. M.; BAKER, M. G. Multispectral data for mapping soil texture: Possibilities and limitations. **Appl. Eng. Agric.**, v. 16, p. 731-741, 2000.
- BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos.** Campinas, 2005. 120 p. Dissertação de Mestrado.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10., 1994, Ann Arbor. **Proceedings...** Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, v. 1, p. 407- 418, 1994.
- BÖHMER, C. R.; SCHÖFFEL, E.; MENDEZ, M.; RIBEIRO, D.; PAULA, V.; FRAGA, D. Albedo de morangueiro sob cultivo orgânico em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracajú/Sergipe. **Anais...** Aracaju/SE: CBAGRO, 2007.
- BRYANT, R. G. Validated linear mixture modeling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 17, n. 2, p. 315-330, 1996.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de Cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, vol. 23, n. 2, 2005.
- CASTRO JUNIOR, R. M. **Introdução ao Sensoramento Remoto.** São José dos Campos, Laboratório de Topografia e Cartografia – Universidade Federal do Espírito Santo. 2001. 68p.
- COSTA FILHO, P. L. D. R.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; OLIVEIRA, S. N.; SODRÉ, R. V. R.; MACHADO, W. P.; CHAVES, T. A.; MARTINS, E. S. Estudo preliminar da vegetação da parte do médio curso do Rio Indaiá (MG) utilizando imagem ASTER. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 1631-1638, 2007.
- DALMOLIN, R. S. D. **Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes.** Programa de Pós-graduação em

- Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, 151 p. Tese de Doutorado.
- DEMATTÊ, J. A. M.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, Campinas, v.62, n. 3, p. 451-464, 2003.
- DEMATTÊ, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMÕES, M. S. Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, vol. 28, n. 5, 2004.
- DETMENDY, D. M.; PACE, W. H. A model for spectral signature variability for mixtures. In: SHAHROKHI, F. (Ed.). **Remote Sensing of Earth Resources**. Tullahoma: University of Tennessee, v. 1, p. 596-620, 1972.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. **Boletim Técnico**, nº 53, SNLCS, Rio de Janeiro, 1978, 455 p..
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Rio de Janeiro. Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 10. Súmula. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979. 83 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Embrapa/CNPS, 2 ed, 1997. 212 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, Embrapa Produção de informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto de três parâmetros agronômicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 10, p. 1615-1624, 1991.
- FERRAZ, P.; ÂNGULO FILHO, R.; PIEDADE, S. M. S.; MONTEIRO, R. O. C. Influência do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 6335-6342, 2007.
- FERREIRA, M. E. **Análise do modelo linear de mistura espectral na discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado)**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2003, 127 p. Dissertação de Mestrado.

- FERRI, C. P. **Utilização da reflectância espectral para estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [Glycine max (L.), Merrill]**. São José dos Campos: INPE. 2002. 173p.
- FIDALGO, E. C. C.; ABREU, M. B. Uso de imagens ASTER para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio São Domingos, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 3747-3753, 2005.
- FORMAGGIO, A. R. **Características Agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e feijão**. Piracicaba. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – USP, 1989, 161 p. Tese de Doutorado.
- FORMAGGIO, A. R.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M. Comportamento espectral (450- 2500nm) e mineralogia de argila de alguns solos tropicais brasileiro. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Mérida/Venezuela. **Anais...** Mérida: INPE, p. 6284, 1995.
- GALVAO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties. **International Journal of Remote Sensing**, Inglaterra, v. 27, n. 4, p. 769-777, 2006.
- GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 11, p. 1725-1734, 1985.
- GENÚ, A. M. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização e avaliação pontual e espacial de solos e seus atributos**. Piracicaba, 2006, 120 p. Tese de Doutorado.
- GOEDERT, W. J. **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégia de manejo**. Ed. Nobel, Brasília, DF, Embrapa/CPAC, 1985. p. 33-74.
- GÖERGEN, L. C.; BERRA, E. F.; BENEDETTI, A. C. P.; BRANDELERO, C.; BACKES, K. S.; PEREIRA, R. S. Caracterização espectral de folhas e influência do tempo após a coleta de folhas na reflectância de *Erythrina crista-galli* L. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 2753-2759, 2009.
- HUBBARD, B. E.; CROWLEY, J. K. Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: data dimensionality issues e solutions. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 173-186, 2005.
- JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 20, n. 1, p. 43-56, 1986.

- JACKSON, R. D.; TEILLET, P. M.; SLATER, P. N.; FEFOSEJEVS, G.; JASINSKI, M. F.; AASE, J. K. ; MORAN, M. S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery, **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n. 2–3, p. 189–202, 1990.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 3, p.155-159, 1970.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. B.; HEIDEBREICHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J. ; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - interactive visualization and analsis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163. 1993.
- LUIZ, A. J. B.; BARROS, M. G. M. de; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Comportamento espectral associado a parâmetros agrônômicos de soja (*Glycine max*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 103-110, 2001.
- MAAS, S. J. Linear mixture modeling approach for estimating cotton canopy ground cover using satellite multispectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 72, p. 304-308, 2000.
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3. ed. Chichester: John Wiley ; Sons, 1993. 352 p.
- MEDINA, A. S.; MEDINA, S. S. S. A Representação da Superfície Topográfica através de Modelos Digitais de Terreno. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMETRIA E DESENHO TÉCNICO, 18. E INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN, 7., 2007, Curitiba. **Anais...** Departamento de Desenho: UFPR, Curitiba. 2007.
- MELLO, M. P. de; PRADO, B. R. do; SILVA, G. B. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E. Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 2839-2846, 2009.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais**. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 2001. 262p.

- MOREIRA, A. M. **Fundamentos do sensoramento remoto e metodologia de aplicação**. 2^a ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.
- MOREIRA, R. C.; GALVÃO, L. S. Identificação espectral SAM em áreas urbanas com imagem do sensor HSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 1159-1166, 2009.
- PINO, F.A. Estatísticas agrícolas para o século XXI. **Agricultura em São Paulo**, v. 46, n. 2, p. 71-105, 1999.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 192p.
- RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340 p.
- SANCHES, I. D.; EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Revista Agrícola São Paulo**, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo**. 5^a ed. Viçosa, SBCS, 2005. 92p.
- SCALOPPI, J. E.; DIAS, K. F. S. Relação entre a pressão de operação e a uniformidade de distribuição de água de aspersores rotativos por impacto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1996, Bauru. **Anais...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. CD Rom.
- SENSEMAN, G. M.; BAGLEY, C. F.; TWEDDALE, S. A. Correlation of rangeland cover measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. **Geocarto International**, v. 11, n. 3, p. 29-38, 1996.
- SILVA, G. B. S.; BETIOL, G. M. e SANO, E. E. Análise comparativa de quatro métodos de classificação supervisionada para a discriminação de fitofisionomias de Cerrado. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, v. 12, n. 1, p. 3935-3947, 2008.
- SILVA, M. K. A.; BRITO, J. L. S.; ROSA, R. Mapeamento do uso do solo no município de Pedrinópolis – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 16-21, 2005.
- SILVA, P. R.; DUCATI, J. R. Uso de técnicas de sensoriamento remoto e espectroradiometria, aplicadas a vinhedos de diferentes regiões do Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais**. In: Congresso Latino-Americano de Viticultura e Enologia, 1., 2005,

- Bento Gonçalves. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, v. 1. p. 285-285, 2005.
- SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constrains of spectral mixtures. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP, 1985, Pasadena, CA. **Proceedings...**, Pasadena: JPL Public, p p. 62-68, 1985.
- SOUSA JUNIOR, J. G. A. **Sensoriamento remoto e informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. Piracicaba, 2005, 141 p. Tese de Mestrado.
- SOUZA FILHO, C. R., TÁPIA, C. H., CRÓSTA, A. P. & XAVIER, R. P. Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hidrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS), ANNUAL CONFERENCE – “TECNOLOGY: CONVERGING AT THE TOP OF THE WORLD”, 2003. **Proceedings...** p. 1-12. 2003.
- VETTORI, L. **Métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo, boletim técnico n. 7, 1969. 24p.
- ZHOU, Q.; ROBSON, M.; PILESJÖ, P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 9, p. 1815-1820, 1998.
- ZHU, G. B; BLUMBERG, D. G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: the case study of Beer Sheva, Israel. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.80, p.233-240, 2002.

ANEXO I

Culturas da Fazenda Santa Tereza - 2006

Pivôs	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
01	---	Feijão Pérola P. 07/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C.25/09	Intervalo sem cultura	Milho Comercial P. 11/10	Milho Comercial	Milho Comercial
02	---	Feijão Pérola P. 27/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 15/09	Milho Comercial P. 21/10	Milho Comercial	Milho Comercial
03	---	Feijão Pérola P. 16/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 04/09		Soja Comercial P. 20/11	Soja Comercial
04	---	---	Feijão Pérola P. 24/06	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 12/10	Soja Comercial P. 16/11	Soja Comercial
05	---	Trigo Emp. 42 P. 09/05	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo BRS 264 C. 07/08	Feijão Precoce P. 27/09	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce
06	---	---	---	---	---	---	---	---	---
07	---	---	Feijão Pérola P. 06/06	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 04/10	Soja Comercial P. 15/11	Soja Comercial
08	---	Trigo Emp. 42 P. 04/05	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42 C. 03/09 Feijão Precoce P. 16/09	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce
09	---	---	Feijão Precoce P. 19/06	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce C. 17/09	Milho Comercial P. 09/10	Milho Comercial	Milho Comercial
10	---	Trigo Emp. 42 P. 20/05	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42 C. 20/09 Feijão Precoce P. 25/09	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce
11	---	Trigo Emp. 42 P. 25/05	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42	Trigo Emp. 42 C. 10/09 Feijão Precoce P. 19/09	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce
12	Feijão Precoce P. 28/04	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce C. 05/08	Intervalo sem cultura	Milho Comercial P. 05/10	Milho Comercial	Milho Comercial

Culturas da Fazenda Santa Tereza - 2008

Pivôs	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
01	Milho Semente P. 07/01	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente C. 05/05 Feijão Pérola P. 28/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 15/09	Milho Semente P. 13/10	Milho Semente	Milho Semente
02	---	---	---	---	---	Feijão Pérola P. 10/06	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 25/09	Intervalo sem cultura	Milho Semente P. 01/11	Milho Semente
03	Milho Semente P. 12/01	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente C. 16/05	Intervalo sem cultura	Feijão Pérola P. 02/07	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 10/10 Milho Semente P. 22/10	Milho Semente	Milho Semente
04	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente C. 27/04	Feijão Pérola P. 19/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 10/09 Milho Semente P. 29/09	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente
05	Milho Comercial	Milho Comercial	Milho Comercial C. 06/03	Trigo BRS 264 P. 23/04	Trigo BRS 264	Trigo BRS 264	Trigo BRS 264	Trigo BRS 264 C. 21/08	Intervalo sem cultura	Feijão Precoce P. 11/10	Feijão Precoce	Feijão Precoce
06	Milho Comercial	Milho Comercial	Milho Comercial	Milho Comercial C. 17/04 Feijão Precoce P. 26/04	Feijão Precoce	Feijão Precoce	Feijão Precoce C. 25/07	Intervalo sem cultura	Intervalo sem cultura	Intervalo sem cultura	Milho Comercial P. 30/11	Milho Comercial

07	Milho Semente P. 02/01	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente C. 01/05	Feijão Pérola P. 25/06	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 08/10 Milho Comercial P. 23/10	Milho Comercial	Milho Comercial
08	Milho Comercial	Milho Comercial C. 29/02	Intervalo sem cultura	Intervalo sem cultura	Feijão Pérola P. 05/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 25/08	Milho Semente P. 05/09	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente
09	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10	Milho Comercial	Milho Comercial	Milho Comercial C. 24/03	Intervalo sem cultura	Feijão Pérola P. 09/05	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola C. 30/08	Milho Semente P. 10/09	Milho Semente	Milho Semente	Milho Semente
11	Milho Comercial	Milho Comercial	Milho Comercial C. 16/03	Intervalo sem cultura	Trigo BRS 254 P. 05/05	Trigo BRS 254	Trigo BRS 254	Trigo BRS 254	Trigo BRS 254 C. 04/09 Feijão Pérola P. 24/09	Feijão Pérola	Feijão Pérola	Feijão Pérola
12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Onde: P: data de plantio e C: data de colheita.

Observação: Os pivôs 09 e 12 estão divididos em varias culturas, como: cenoura, beterraba, milho pesquisa, milho semente, feijão.