

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE
ZONAS DE MANEJO EM ÁREAS DE ALGODÃO**

ANDRÉ SALVADOR
Engenheiro Agrônomo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia - Área de Concentração em
Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Outubro - 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE
ZONAS DE MANEJO EM ÁREAS DE ALGODÃO**

ANDRÉ SALVADOR
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Rocha Antuniassi

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia - Área de Concentração em
Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Outubro - 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S182i Salvador, André, 1976-
 Imagens aéreas multiespectrais na identificação de zo-
nas de manejo em áreas de algodão / André Salvador. - Bo-
tucatu : [s.n.], 2005.
 xiii, 123 f. : il. color., gráfis., tabs.

 Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2005
 Orientador: Ulisses Rocha Antuniassi
 Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Sensoriamento remoto. 3.
Vegetação - Mapeamento. 4. Adubos e fertilizantes - Apli-
cação. 5. Pesticidas - Aplicação. I. Antuniassi, Ulisses
Rocha. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mes-
quita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

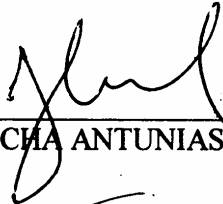
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM ÁREAS DE ALGODÃO.

ALUNO: ANDRÉ SALVADOR

ORIENTADOR: PROF. DR. ULISSES ROCHA ANTUNIASSI

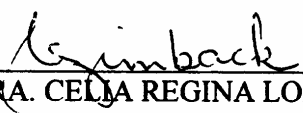
Aprovado pela Comissão Examinadora:



PROF. DR. ULISSES ROCHA ANTUNIASSI



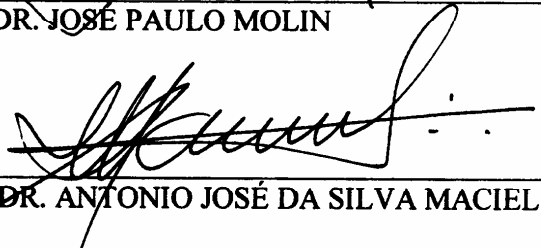
PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. JOSÉ PAULO MOLIN



PROF. DR. ANTONIO JOSÉ DA SILVA MACIEL

Data da Realização: 25 de outubro de 2005.

DEDICO

À minha esposa Mariana
pela compreensão e pelo apoio
durante minha ausência para realização desta tese.

Ao Professor Tim Sharp
pela confiança, pelos ensinamentos,
e pela oportunidade de realização deste trabalho,
OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- À Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP Câmpus de Botucatu, pela formação de Engenheiro Agrônomo, e à Pós Graduação em Agronomia - Energia na Agricultura, pela oportunidade de realização deste doutorado.
- Ao convênio Capes-Fipse pela bolsa de doutorado sanduíche concedida.
- Ao Professor Ulisses Rocha Antuniassi pela orientação e valiosa contribuição à minha formação profissional.
- Ao Professor Tim Sharp, pela orientação e oportunidade de realização deste trabalho, e a sua esposa Martha Sharp, pela amizade e carinho.
- À Susie Powers, por ser uma excelente pessoa, tendo me acolhido como um filho durante os anos que vivi em sua casa nos Estados Unidos.
- À família Applegate, Rick, Rebecca, Thomas e Lacy, pela confiança, amizade e carinho que sempre tiveram por mim.
- A todos os colegas do Dep. de Agricultura da Jackson State C. College, Mitch Pigue, Bob Moore, Greg Evans, Stacey Hollowell, pelos bons momentos vividos no Tennessee.
- À família Karcher, por ter permitido a realização deste trabalho em sua propriedade.
- Aos membros da banca examinadora e seus suplentes Luis Antonio Balastreire, Sergio Campos e Otavio Jorge Grigoli Abi Saab, pelas inúmeras contribuições.
- Ao Professor Kléber Pereira Lanças em especial, pela orientação pessoal e profissional durante toda minha carreira universitária.
- Ao Professor Ciro A. Rosolem, por ser inspiração a todos que trabalham com a cultura do algodão.
- Ao amigo Fábio H. R. Baio, pelo exemplo de dedicação e por sua presença e auxílio em todos os momentos da realização deste trabalho.
- Ao amigo Newton Tamassia Pégolo, pelas idéias e pelo auxílio na correção desta tese.
- À todas as pessoas que colaboraram para a elaboração deste trabalho.
- À minha mãe Cleonira Furlan, pelo carinho e dedicação aos filhos.
- A meus pais Mario e Suely e a sua família, por terem me acolhido como um filho.
- À minha esposa e companheira Mariana, pelo amor, carinho e apoio.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1 Agricultura de precisão.....	7
4.1.1 Mapeamento dos fatores de produção.....	8
4.1.1.1 Fatores que afetam a produtividade das culturas.....	9
4.1.1.2 Equipamentos utilizados no mapeamento dos fatores de produtividade...	11
4.1.1.3 Sistemas de posicionamento e navegação por satélites.....	14
4.1.2 Sistemas de suporte à decisão.....	16
4.1.3 Aplicação localizada de insumos.....	17
4.2 A cultura do algodão.....	20
4.2.1 Características do desenvolvimento do algodão.....	20
4.2.2 Monitoramento dos atributos físicos das plantas de algodão.....	24
4.3 Sensoriamento remoto multiespectral.....	30
4.3.1 Considerações sobre o espectro eletromagnético e suas aplicações.....	31
4.3.2 Considerações sobre a resolução de imagens multiespectrais.....	34
4.3.3 Tipos de sensores remotos com aplicações na agricultura.....	35
4.3.4 Interpretação e classificação das imagens multiespectrais.....	39
4.3.5 Aplicações das imagens aéreas multiespectrais em áreas de algodão.....	40
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
5.1 Material.....	44
5.1.1 Local de condução do experimento.....	44
5.1.2 Dados climatológicos.....	44
5.1.3 Imagens aéreas multiespectrais.....	45

5.1.4	Sistemas de posicionamento global.....	48
5.1.5	Sistema de informação geográfica.....	49
5.1.6	Programas computacionais.....	49
5.2	Métodos.....	49
5.2.1	Seqüência de operações.....	49
5.2.2	Aquisição das imagens aéreas multiespectrais.....	50
5.2.3	Aquisição das coordenadas dos pontos de controles.....	51
5.2.4	Georreferenciamento das imagens aéreas multiespectrais.....	51
5.2.5	Classificação das imagens em zonas de manejo por classes de vegetação.....	51
5.2.6	Amostragem a campo dos atributos físicos das plantas de algodão.....	52
5.2.7	Avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão.....	53
5.2.8	Classificação das imagens em cinco classes de NDVI e suas implicações nas amostragens a campo.....	53
5.2.9	Verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço.....	54
5.2.10	Avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada nas zonas de manejo obtidas para os diferentes anos.....	54
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
6.1	Dados climatológicos.....	56
6.2	Imagens aéreas multiespectrais.....	57
6.3	Imagens aéreas multiespectrais georreferenciadas.....	57
6.4	Imagens classificadas em três zonas de manejo pelas classes de NDVI.....	58
6.5	Avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão.....	64
6.5.1	Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2001.....	64
6.5.2	Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2002.....	66
6.5.3	Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2003.....	68
6.5.4	Comparação entre o estande de plantas para os três anos.....	69
6.5.5	Comparação entre a altura das plantas para os três anos.....	70
6.5.6	Comparação entre o número total de nós por planta para os três anos.....	71
6.5.7	Comparação entre o número total de maçãs por planta para os três anos.....	72

6.6	Imagens classificadas em cinco classes de NDVI e suas implicações nas amostragens a campo.....	73
6.7	Verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço.....	78
6.7.1	Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2001 e 2002...	79
6.7.2	Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2001 e 2003...	82
6.7.3	Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2002 e 2003...	86
6.8	Avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos nas zonas de manejo obtidas para os diferentes anos.....	89
6.8.1	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2001 e 2002.....	90
6.8.2	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2002 e 2001.....	91
6.8.3	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2001 e 2003.....	94
6.8.4	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2003 e 2001.....	94
6.8.5	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2002 e 2003.....	97
6.8.6	Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2003 e 2002.....	97
6.8.7	Resumo geral da porcentagem de acerto e erro para todos os anos.....	100
6.9	Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.....	102
7	CONCLUSÕES.....	105
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Número médio de unidades de graus dia (DD60s) necessários para diversos estágios de desenvolvimento do algodão para o Estado do Missouri (Albers, 1999)..	22
2 Exemplos de sensores, plataforma e resolução espectral e espacial utilizados por alguns autores em trabalhos de sensoriamento remoto aplicados na agricultura.....	38
3 Precipitação pluvial total mensal e temperatura média do ar para os meses dos anos de 2001, 2002, 2003 e média histórica (normal) para os anos de 1961 a 1990 (Memphis Climatological Data, 2004)	45
4 Intervalos de valores de NDVI para as três classes de NDVI obtidas pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003.....	63
5 Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2001.....	64
6 Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2002.....	66
7 Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2003.....	68
8 Intervalos de valores de NDVI obtidos pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003 em três e em cinco classes de NDVI.	73
9 Porcentagem das áreas de estabilidade e de transição entre as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas entre imagens comparadas duas a duas entre os anos de 2001x 2002, 2001 x 2003, e 2002 x 2003.....	78
10 Porcentagem de acerto (A) e de erro (E) com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparadas com a de outro ano.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Representação gráfica das regiões do espectro eletromagnético (adaptado de CASSINI UVIS, 2005).....	32
2 Representação gráfica das regiões do espectro eletromagnético coletadas por sensores fotográficos e não fotográficos (adaptado de Schlemmer et al., 1999).....	37
3 Imagem aérea multiespectral obtida em 02 / 08 / 2001.....	46
4 Imagem aérea multiespectral obtida em 07 / 08 / 2002.....	47
5 Imagem aérea multiespectral obtida em 05 / 09 / 2003.....	48
6 Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2001.....	59
7 Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2001.....	59
8 Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2002.....	60
9 Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2002.....	60
10 Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2003.....	61
11 Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2003.....	61
12 Estande de plantas de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.....	69
13 Altura das plantas de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.....	70
14 Número total de nós por planta de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.....	71
15 Número total de maçãs por planta de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.....	72

16	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2001.....	75
17	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2001.....	75
18	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2002.....	76
19	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2002.....	76
20	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2003.....	77
21	Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2003.....	77
22	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	80
23	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.....	80
24	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.....	81
25	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.....	81
26	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	82

27	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	83
28	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.....	84
29	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.....	84
30	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.....	85
31	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	85
32	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	87
33	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.....	87
34	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.....	88
35	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.....	88
36	Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.....	89

- 37 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2001 (a) comparada com as de 2002, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2001 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 92
- 38 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2002 (a) comparada com as de 2001, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2002 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 93
- 39 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2001 (a) comparada com as de 2003, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2001 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 95
- 40 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2003 (a) comparada com as de 2001, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2003 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 96
- 41 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2002 (a) comparada com as de 2003, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2002 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 98
- 42 Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2003 (a) comparada com as de 2002, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2003 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d)..... 99

- 43 Porcentagem de acerto e de erro para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI e para a Média da área com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparada com a de outro ano, duas a duas para os anos de 2001, 2002 e 2003..... 101
- 44 Porcentagem de acerto e de erro para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI e para a Média da área com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de NDVI obtidas pela média das seis combinações entre as imagens de um ano quando comparada com a de outro ano, duas a duas para os anos de 2001, 2002 e 2003..... 102

IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO EM ÁREAS DE ALGODÃO. Botucatu, 2005. 123p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: ANDRÉ SALVADOR

Orientador: ULISSES ROCHA ANTUNIASSI

1 RESUMO

Os fatores que afetam a produtividade das culturas apresentam variabilidade espacial e temporal nas áreas de produção e estão associados a variações no vigor das plantas. Esta variabilidade permite a identificação de zonas de manejo e tratamento localizado de diferentes regiões dentro do campo. A finalidade deste estudo foi o uso de imagens aéreas multiespectrais na identificação de zonas de manejo e sua implicação na aplicação localizada de insumos em área de produção comercial de algodão. Para tal, imagens aéreas multiespectrais de três anos foram usadas para a geração de classes de vegetação, pelo índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI), que dividiram a área em três regiões. Nestas regiões foram amostrados os atributos físicos das plantas de algodão para verificar a existência de diferenças entre as plantas encontradas em cada região e com isso identificar zonas de manejo. Os atributos físicos das plantas de algodão (estande, altura, número total de nós e número total de maçãs por planta) foram amostrados em 8 repetições com 10 plantas por classe de NDVI. A avaliação estatística dos atributos amostrados foi realizada pelo delineamento em parcelas subdivididas com teste de Tukey a 5% de probabilidade. As imagens foram reclassificadas em cinco classes de NDVI para avaliar as implicações dos resultados obtidos a campo sobre a localização dos pontos de amostragem dos atributos físicos das plantas de algodão. As classes de NDVI dos vários anos foram sobrepostas para avaliação das áreas de estabilidade e de transição das imagens e verificar a estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço. A avaliação da implicação do uso das zonas de manejo na

aplicação localizada de insumos foi realizada pelo cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI utilizadas como zonas de manejo em um ano para a aplicação localizada de insumos em outro, pelas seis combinações existentes entre os anos de 2001, 2002 e 2003. Os resultados demonstraram a possibilidade de se identificar zonas de manejo para a cultura do algodão com a utilização de imagens aéreas multiespectrais. A classificação das imagens multiespectrais pelo índice de vegetação com diferenças normalizadas (NDVI) permitiu a divisão da área em três classes com características semelhantes em todos os anos. Houve diferenças estatísticas para todos os anos entre as classes de baixo e alto NDVI, sendo que as plantas das classes de alto NDVI apresentaram maior altura, maior número total de nós e maior número total de maçãs que as plantas encontradas na classe de baixo NDVI. Não houve diferença no estande das plantas entre as classes de baixo e alto NDVI para os três anos, e todas as classes tiveram o mesmo estande de plantas nos anos de 2001 e 2003, conforme o esperado pela semeadura com distribuição uniforme de sementes. A classificação das imagens em cinco classes de NDVI permitiu a verificação da amostragem de plantas em áreas de transição entre as três classes de manejo. Isto justificou a recomendação de classificação das imagens em cinco classes de NDVI para a amostragem em três classes (baixo, médio, alto NDVI), com a utilização das duas classes intermediárias (baixo-médio, médio-alto NDVI) como faixa de segurança da amostragem. A comparação entre as classes de NDVI para todos os anos confirmou a estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço. A soma das áreas de estabilidade entre as classes dos diversos anos variou entre 58 e 66% de toda a área. Foi possível avaliar as implicações do uso das classes de NDVI como zonas de manejo em um ano para prescrição da aplicação localizada de insumos em outro ano pelo cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI. A porcentagem de acerto média das comparações entre todos os anos foi de 81% com o uso das classes de NDVI de um ano como zonas de manejo para a aplicação localizada de insumos em outro. A aplicação localizada de insumos pode ter início em qualquer ano com base nas imagens multiespectrais obtidas no ano anterior.

Palavras chave: agricultura de precisão, aplicação localizada, sensoriamento remoto, mapeamento da cultura.

MULTISPECTRAL IMAGERY FOR MANAGEMENT ZONES IDENTIFICATION

IN COTTON AREAS. Botucatu, 2005. 123p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANDRÉ SALVADOR

Adviser: ULISSES ROCHA ANTUNIASI

2 SUMMARY

Crop yield is influenced by several factors with variability in time and space that are associated with the variations in the plant vigor. This variability allows the identification of management zones and site-specific applications to manage different regions of the field. The purpose of this study was the use of multispectral imagery for management zones identification and implications of site-specific application in commercial cotton areas. Multispectral airborne images from three years were used to classify a field into three vegetation classes via the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The NDVI classes were used to verify the potential differences between plant physical measurements and identify management zones. The cotton plant measurements sampled in 8 repetitions of 10 plants at each NDVI class were Stand Count, Plant Height, Total Nodes and Total Bolls. Statistical analysis was performed with treatments arranged in split plot design with Tukey's Test at 5% of probability. The images were classified into five NDVI classes to evaluate the relationship between cotton plant measurement results and sampling location across the field. The three years NDVI classes were layered together to evaluate the amount of stable and transition areas in the images leading the ability to verify the management zones stability in time and space. Analysis of the percentage of right and wrong target zones location between NDVI classes of one year compared to another, combined two by two for the years 2001, 2002 and 2003, were evaluated to verify the management zones implication of site-specific application.

The results have demonstrated the possibility of using multispectral imagery for management zones identification in cotton areas. The image classification into three NDVI classes showed three different zones in the field with similar characteristics for the studied years. Statistical differences were shown for plant height, total nodes and total bolls between low and high NDVI classes for all years. High NDVI classes contained plants with greater height, total nodes and total bolls compared to low NDVI classes. There were no difference in Stand Count between low and high NDVI classes for the three studied years. The final plant stand was the same between all NDVI classes for 2001 and 2003 as it was expected due to the conventional seeding application with the same rate of seeds for the entire field. The image classification into five NDVI classes allowed the evaluation between cotton plant measurement results and sampling location across the field. The comparison results justified the recommendation of having multispectral images classified into five NDVI classes to allow plant mapping in the low, medium and high NDVI classes with low-medium and medium-high NDVI classes used as buffer zones for plant sampling across the field. The comparison between all the years NDVI classes location confirmed the management zones stability in time and space. Stability areas between NDVI classes covered from 58% to 66% of the total area. The analysis of the percentage of right and wrong target zones location between NDVI classes of one year compared to another allowed the results verification of having a prescription map based in one year management zones on the site-specific application map based in another year. The percentage of right target zones location between all NDVI classes for all years was 81% with the use of site-specific application in the management zones. The study showed the possibility of starting site-specific applications at any given year based on any multispectral imagery.

Keywords: precision agriculture, site-specific application, variable rate, remote sensing, plant mapping.

3 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão procura otimizar os benefícios de uma agricultura praticada com base na aplicação localizada de insumos com aumento da lucratividade e com redução de custos, do uso de insumos e dos impactos ambientais.

Durante o crescimento de uma cultura é possível observar diferenças no vigor das plantas localizadas em diferentes regiões do campo em função das variações espaciais e temporais dos fatores de produção relacionados à planta, ao solo e as condições do meio.

A identificação de zonas de manejo dentro do campo com base na variabilidade dos fatores que limitam a produção pode ser realizada com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto.

Imagens aéreas multiespectrais podem ser realizadas em qualquer fase de desenvolvimento das culturas e usadas na identificação e categorização de diferenças e similaridades das culturas com a utilização de índices de vegetação baseados nas características espectrais das regiões do visível e do infravermelho.

As imagens multiespectrais podem ser úteis no monitoramento das plantas de algodão que é realizado pelos produtores durante o desenvolvimento da cultura para identificar problemas e padrões de desenvolvimento que permitam seu manejo adequado, além de fornecer informação suficiente para a prescrição de zonas de manejo para a aplicação localizada de insumos.

O presente trabalho teve por objetivo geral o uso de imagens aéreas multiespectrais na identificação de zonas de manejo e sua implicação na aplicação localizada de insumos em área de produção comercial de algodão.

Seus objetivos específicos foram:

- (a) classificar imagens aéreas multiespectrais de três anos pelo índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) para divisão da área em três classes de manejo;
- (b) verificar a existência de diferenças entre as plantas encontradas em cada classe de NDVI pela amostragem dos atributos físicos das plantas de algodão;
- (c) classificar as imagens em cinco classes de NDVI para criar uma metodologia de amostragem levando em consideração as implicações dos resultados obtidos nas amostragens a campo;
- (d) avaliar a estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço pela sobreposição das classes de NDVI dos vários anos pelo cálculo das áreas de estabilidade e de transição das imagens;
- (e) avaliar a implicação do uso das zonas de manejo na aplicação localizada de insumos pelo cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI utilizadas como zonas de manejo em um ano para a aplicação localizada de insumos em outro, pelas seis combinações existentes entre os anos de 2001, 2002 e 2003.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Agricultura de precisão

A crescente demanda mundial por alimentos tem impulsionado a evolução da agricultura, que passa a ser mais empresarial que de subsistência, adotando novos métodos administrativos e gerenciais para a tomada de decisão baseados na informatização da atividade de produção (Salvador, 2002). A agricultura de precisão pode ser definida com um conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado de culturas (Balastreire, 1998a).

Os fundamentos da agricultura de precisão estão baseados na existência de desuniformidade dos fatores que afetam a produção das culturas, na possibilidade de mensurar estes fatores de maneira localizada dentro das áreas e na capacidade de tratamento individualizado dessas pequenas porções de áreas dentro de um campo de produção. Para Elias (1998), a agricultura convencional baseia-se na pressuposição da homogeneidade das propriedades e características físicas, químicas e biológicas dos solos e das culturas. Segundo Molin (1997a), os agricultores tradicionalmente assumem a uniformidade de suas áreas e, com base nesta interpretação, aplicam quantidades uniformes de insumos como fertilizantes, defensivos e sementes.

Molin (1997a), Balastreire (1998a) e Balastreire (1999) identificaram relatos de trabalhos que demonstraram que as primeiras iniciativas de tratamento localizado ocorreram em 1929 na correção da acidez do solo. Na realidade, as práticas da agricultura de

precisão tem sido utilizadas desde os tempos em que pequenas áreas eram cultivadas e grande parte do trabalho era feito manualmente, incluindo o tratamento individualizado para uma planta ou pequenas áreas. Com o aumento das áreas cultivadas e com o desenvolvimento da mecanização agrícola, tem havido uma tendência de redução na quantidade das informações coletadas a campo e de tratamento uniforme para grandes áreas (Molin, 1997a).

A utilização das técnicas da agricultura de precisão tem como objetivo a otimização dos benefícios econômicos e ambientais (Hayes & Privette III, 1997; Stafford, 2000). Segundo Mantovani et al. (1998), tais benefícios podem ser alcançados pela racionalização do uso de insumos e energia, que reduzem os custos do produto final e os impactos ambientais. Para Balastreire (1999), a redução dos custos ocorre nos locais de baixo potencial produtivo, sendo possível reduzir a quantidade de insumos desses locais sem perder a produtividade média da área, ou realocar os insumos desses locais para outros com maior potencial produtivo visando aumento da produtividade sem gastos adicionais de insumos. Blackmore & Larscheid (1997) identificaram três estratégias de manejo: (1) realocação dos insumos para obter a máxima produtividade possível, (2) redução da quantidade de insumos para produtividade economicamente viável e baixo impacto ambiental, (3) redução da quantidade de insumos necessária para obter impacto ambiental extremamente baixo.

Segundo Antuniassi & Gadanha Júnior (2000) a agricultura de precisão pode ser dividida em três etapas: (1) o mapeamento detalhado dos fatores de produção, (2) os sistemas de suporte à decisão, e (3) a aplicação localizada de insumos.

4.1.1 Mapeamento dos fatores de produção

Para a realização da etapa da agricultura de precisão caracterizada pelo mapeamento detalhado dos fatores de produção é necessário o conhecimento dos fatores que afetam a produtividade das culturas, dos equipamentos capazes de mensurar e mapear as características de tais fatores, e dos sistemas de posicionamento e navegação utilizados durante as atividades.

A busca pela identificação de zonas de manejo dentro do campo baseadas na variabilidade dos fatores que limitam a produção é uma das preocupações da agricultura de precisão, sendo alvo de muitas pesquisas. Doerge (1999) definiu zona de

manejo como sendo uma sub-região de uma área que expressa uma combinação homogênea de fatores limitantes à produtividade, na qual a aplicação de uma dose uniforme de um insumo específico é apropriada.

Segundo Stafford (1999), a agricultura de precisão tem sido impulsionada pelo avanço tecnológico de equipamentos que permitem a aplicação localizada de insumos em áreas agrícolas, porém, a interpretação da variabilidade espacial e o necessário entendimento agrônomo dos fatores de produção relacionados às culturas e aos solos de maneira localizada dentro das áreas de produção ainda estão pouco desenvolvidos. Pelo contrário, diversas pesquisas têm mostrado grande desenvolvimento na compreensão dos fatores de produção e sua utilização na identificação de zonas de manejo para a aplicação localizada de insumos, como pode ser visto nos trabalhos: (1) de Blackmore & Larscheid (1997), na identificação de tipos de variabilidade das culturas e do solo e na criação de zonas de manejo baseadas em mapas de estabilidade de rendimento das culturas; (2) de Clay et al. (2004), na determinação da melhor abordagem na identificação de zonas de manejo de nutrientes do solo; (3) de Mount (2001), na compreensão das relações entre características do solo e clima para obtenção de informações necessárias para a tomada de decisão no manejo localizado; (4) de Salvador (2002), na comparação de métodos de mapeamento da distribuição espacial da infestação de plantas daninhas.

4.1.1.1 Fatores que afetam a produtividade das culturas

Diversos fatores afetam a produtividade das culturas, entre eles estão as características fisiológicas das plantas, seu manejo, as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, a quantidade de água disponível, o manejo de plantas daninhas, insetos e doenças, as características do clima, a topografia do local de produção, entre outras.

Thomasson et al. (2003) descreveram a possibilidade de observar, durante o desenvolvimento da cultura, variações no vigor das plantas de forma diferenciada dentro da área, as quais estavam associadas a vários fatores de estresse que influenciaram na produtividade. Pode-se extrapolar este raciocínio de modo a considerar as próprias plantas como o melhor sensor para medir os fatores que afetam a produtividade das culturas (Stafford,

2000), uma vez que a expressão conjunta de todos os fatores de produção irá resultar nas diferenças de seu rendimento de forma localizada dentro da área.

Segundo Blackmore & Larscheid (1997), três formas de variabilidade podem ser identificadas: a espacial, a temporal e a prevista. A variabilidade espacial é a variação de uma característica observada ao longo de uma área, ou seja, no espaço, podendo ser facilmente observada em mapas de solo e de produtividade. A variabilidade temporal é a variação de uma característica com o passar do tempo, podendo ser observada, como por exemplo, pela comparação de mapas de produtividade de diferentes anos. A variabilidade prevista é aquela que descreve as diferenças entre o que foi previsto em termos de manejo e o que realmente aconteceu, sofrendo influência de fatores como o clima, produtividade esperada, qualidade do produto. Esta variabilidade está mais relacionada ao erro de manejo do que a uma característica biológica.

Antuniassi (2000) fez considerações sobre o mapeamento de fatores ligados à cultura e ao solo. Segundo o autor, os principais fatores de variabilidade espacial que têm sido estudados são o rendimento ou produtividade das culturas e as características de fertilidade dos solos. Segundo Mantovani et al. (1998), as características das culturas e do solo variam no espaço e no tempo, porém enquanto algumas características do solo variam pouco no tempo (como sua textura e teor de matéria orgânica), outras variam rapidamente (como sua umidade e teor de nitrato). Clay et al. (1999), Franzen & Kitchen (1999), Malzer et al. (1999) e Clay et al. (2002) apresentaram recomendações para realização de amostragem representativa de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo em função de sua variabilidade espacial dentro do solo e alternativas economicamente viáveis para o manejo localizado de fertilizantes.

Nordmeyer et al. (1997) e Cardina & Doohan (1999) descreveram o comportamento de plantas daninhas dentro de áreas de produção afirmando que sua distribuição espacial não é uniforme, e sim agregada em manchas ou reboleiras, sendo possível tratá-las de maneira localizada. Ellsbury & Krell (1999) sugeriram a possibilidade de utilização de manejo localizado de insetos nas culturas de soja e milho em função da existência de variabilidade espacial da população de insetos. Dupont et al. (2000) observaram que a presença de insetos estava relacionada a desuniformidade de crescimento das plantas de algodão dentro de uma área, o que permitiu a realização de aplicação localizada de inseticidas

e a redução na quantidade de inseticidas utilizada sem que houvesse redução da produtividade da cultura quando comparada a aplicação uniforme de inseticidas.

Para Reetz Jr. & Fixen (1999), além dos mapas de produtividade das áreas e de fertilidade do solo, informações sobre culturas previamente cultivadas, características do solo, quantidades de nutrientes aplicadas, práticas culturais utilizadas, características do clima, locais com incidência de pragas, mapeamentos de observações a campo, dados econômicos, imagens aéreas e outras informações podem auxiliar na tomada de decisões.

4.1.1.2 Equipamentos utilizados no mapeamento dos fatores de produtividade

A variabilidade espacial de um fator pode ser determinada pela mensuração de sua característica e de sua exata referência de posição dentro do campo (Blackmore & Larscheid, 1997), ou seja, através de um mapa georreferenciado.

Sensores são dispositivos ou componentes de um sistema de medida de grandezas físicas que reagem às mudanças do ambiente, podendo ser ativos (produzem uma tensão de saída sob ação da grandeza física medida) ou passivos (necessitam de uma fonte de alimentação para funcionarem) e analógicos ou digitais (Dias et al., 1998). Os sensores são capazes de determinar as propriedades do solo ou da cultura, transmitindo impulsos de respostas a estímulos físicos como luz, calor, som, magnetismo, movimento, cor, pressão, umidade e outros. Mantovani et al. (1998) citam vários exemplos de sensores e suas aplicações na medição (1) da compactação do solo: penetrômetro de cone, sinais acústicos, cinzel instrumentado medindo força de tração, condutividade elétrica do solo por indução eletromagnética; (2) da umidade do solo: sensores baseados na condutividade elétrica, capacitância, espectrofotometria, reflectância nuclear magnética; (3) da matéria orgânica do solo: sensores baseados na reflexão da luz pela superfície do solo; (4) do teor de nutrientes do solo: sensores que medem a impedância elétrica para correlação com concentração de íons; (5) das plantas daninhas: sensores baseados na emissão e reflexão da luz infravermelha, câmeras de vídeo; (6) de fluxo: sensores de fluxo volumétrico e de massa; (7) de massa e torque: sensores como células de carga equipadas com extensômetros elétricos de resistência; (8) de pressão: sensores que medem o movimento ou flexão de um diafragma metálico; (9) de

velocidade: por tacômetros medindo velocidade angular de um eixo, por radares medindo ondas de som refletidas.

Lems et al. (2000) estimou que 30% da área de soja e milho dos Estados Unidos seria colhida no ano de 2000 por colhedoras equipadas com sistemas de monitoramento da produtividade, que consistem de sensores de fluxo de massa ou de impacto para mensurar o fluxo de grãos a ser convertido em massa, de sensores de umidade dos grãos, de sensores de temperatura dos grãos, de sensor de velocidade de deslocamento da colhedora, de receptor e antena de um sistema de posicionamento global com correção diferencial do sinal (DGPS), e de monitor com tela, microprocessador e cartão de dados PCMCIA (protocolo de comunicação atual, que segundo Humburg (1999a) é muito usado em aplicações de agricultura de precisão). Os autores propuseram formas de calibração e verificação do sistema para garantir a correta medição dos dados. Elias (1998) desenvolveu um sistema para medição em tempo real da produtividade de milho baseado apenas no peso do material colhido, não exigindo a determinação da umidade, temperatura e fluxo de grãos necessários para cálculo do peso. O sistema foi montado em colhedora comercial de grãos, na qual foi colocado um tanque graneleiro apoiado sobre quatro células de cargas utilizadas na medição do peso dos grãos, além de um receptor e antena DGPS para georreferenciamento da posição da colhedora.

Clay et al. (2004) identificaram zonas de manejo para aplicação de fertilizantes em uma área baseadas em diferentes características do solo. Entre as atividades foi realizado o mapeamento da fertilidade do solo pela divisão da área em células para amostragem georreferenciada dos nutrientes do solo. Enquanto Marques Jr. & Corá (1998) apresentaram as causas da variabilidade das propriedades do solo e suas características, Rooney et al. (2001) e Lanças et al. (2005) mapearam a compactação do solo com uso de penetrômetros, além de discutirem os impactos da compactação no crescimento das plantas, métodos de medida e técnicas para resolver o problema. Doerge et al. (2000) apresentaram a possibilidade de mapeamento da condutividade elétrica do solo com utilização de sensores remotos de indução eletromagnética e de eletrodos de contato. Segundo os autores, a condutividade elétrica está correlacionada às propriedades do solo que afetam a produtividade das culturas, como a textura do solo, sua capacidade de troca de cátions, condições de drenagem, teor de matéria orgânica, salinidade, e outras características, sendo a sua medição simples, barata e disponível atualmente.

Outra técnica utilizada para mensurar fatores que afetam a produtividade das culturas é o sensoriamento remoto, pelo uso de imagens aéreas e de satélites. Johannsen et al. (1999) descreveram as potenciais aplicações do sensoriamento remoto no levantamento topográfico, no mapeamento das propriedades do solo, na predição da produtividade das culturas, no levantamento das culturas plantadas em uma área, na detecção da quantidade de nutrientes nas plantas e no solo, nas mudanças do vigor da vegetação, na detecção de danos físicos causados às culturas, na avaliação de resíduos culturais, no monitoramento do clima, na avaliação de estresses sofridos pelas plantas, no mapeamento da capacidade de uso das terras, na avaliação do cumprimento de conformidades legais.

Segundo Clay & Johnson (1999), imagens aéreas podem ser realizadas por vários anos, em diversas fases de uma cultura, fornecendo uma visão de todo o campo e ser potencialmente usada na identificação, categorização e determinação de diferenças e similaridades na cultura e condições do campo em extensas áreas geográficas. Para Diker et al. (2001), imagens multiespectrais podem ser usadas para monitorar mudanças temporais nas culturas e detectar anormalidades no campo, além de estimar a produtividade das culturas. Os autores realizaram estudo com uso de imagens aéreas multiespectrais para estimar a variabilidade na produtividade e variações espaciais e temporais no crescimento das plantas em campos comerciais de produção de milho, integrando técnicas de imagens aéreas com uso de sistemas de informação geográfica e observações de campo. Esses autores concluíram que o mapeamento da produtividade pode ser estimado com índices de características espectrais da cultura e esta informação usada no processo de tomada de decisão em anos seguintes.

Muitas vezes, o único equipamento utilizado no mapeamento de fatores que podem afetar a produtividade é um sistema de posicionamento global, como por exemplo nas atividades de mapeamento de plantas daninhas. Stafford et al. (1996), Nordmeyer et al. (1997), Clay & Johnson (1999) e Salvador (2002) realizaram o mapeamento da distribuição espacial de plantas daninhas pelo contorno das manchas com equipamento de posicionamento por satélite para a determinação das áreas infestadas com plantas daninhas dentro de áreas de produção. De maneira geral, todas as atividades de mapeamento dentro do ciclo da agricultura de precisão levam em consideração o georreferenciamento dos mapas propostos, utilizando algum sistema de posicionamento para obtenção da exata referência de posição dos atributos mapeado dentro das áreas de produção.

4.1.1.3 Sistemas de posicionamento e navegação por satélites

Posicionar um objeto num sistema de referência nada mais é do que atribuir coordenadas a ele, o que atualmente pode ser realizado com relativa simplicidade (Monico, 2000). O autor descreveu todo o processo evolutivo das técnicas de posicionamento, que pode ser exemplificado por métodos e equipamentos utilizados em ordem cronológica: (1) com o advento da navegação marítima, surgiu a necessidade do domínio da arte de navegar (saber ir e voltar de um local a outro e determinar posições geográficas), que inicialmente utilizava o sol, os planetas e as estrelas como fontes de orientação; (2) com o surgimento da bússola foi possível determinar a direção das embarcações, mas não sua posição em alto mar; (3) o astrolábio permitiu a medição da latitude durante a noite com grande margem de erro; (4) instrumentos como o quadrante de Davis e o sextante permitiram a redução no erro de cálculo da latitude; (5) com o avanço da eletrônica surgiram equipamentos baseados na emissão de ondas de rádio utilizados na faixa costeira e capazes de determinar a latitude e a longitude, como o LORAN (long range navigation system), o DECCA (low frequency continuous wave phase comparison navigation) e o OMEGA (global low frequency navigation system); (6) com base no uso de satélites artificiais foi desenvolvido o NNSS (navy navigation satellite system), porém as órbitas dos satélites eram muito baixas e o número de satélites muito pequeno; (7) a solução definitiva para o problema de posicionamento e navegação com abrangência global surgiu na década de 70 com a proposta do Sistema de Posicionamento Global - GPS (global positioning system).

O princípio básico de funcionamento do GPS consiste na triangulação da medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites. Pelo conhecimento das coordenadas dos satélites é possível calcular as coordenadas da antena do receptor do usuário através do tempo que um sinal de rádio leva para chegar do satélite até o receptor, o que é feito através de uma correlação dos códigos gerados e recebido. Três satélites são suficientes para o cálculo da posição do receptor (latitude, longitude e altitude) na superfície terrestre ou próxima dela, porém existe a necessidade de um quarto satélite para resolução da ambigüidade do sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor do usuário (Vettorazzi et al., 1994; Molin, 1997b; Stafford, 1998; Balastreire, 1998b; Monico, 2000).

O sistema de posicionamento global é formado por três segmentos principais: espacial, controle, usuários (Monico, 2000). O segmento espacial é constituído de 24 satélites distribuídos em 6 planos orbitais, responsáveis pela transmissão de duas ondas portadoras: L1 e L2 (com 1575,42 e 1227,60 MHz de frequência e 19 e 24 cm de comprimento de onda, respectivamente). Cada satélite transmite um código C/A e P modulados em fase sobre as duas portadoras, o que permite o cálculo de distâncias a partir da medida do tempo de propagação da modulação. O código C/A (coarse acquisition) é modulado sobre a L1 sem criptografia e está disponível a todos os usuários do globo, sem a cobrança de taxas, com acurácia horizontal e vertical dentro de 10 e 14 m, respectivamente. O código P (precise ou protected) proporciona medidas mais precisas, com acurácia ao redor de 10 a 20 cm, sendo modulado sobre a L1 e L2 com criptografia por ter sinal protegido e reservado para o uso dos militares americanos e seus usuários autorizados, os quais disponibilizam o sinal através de receptores DGPS (sistema de posicionamento global com correção diferencial). O segmento de controle é composto por doze estações terrestres de monitoramento responsáveis pela transmissão de dados entre os satélites e uma estação de controle, a qual processa os dados recebidos, determina as órbitas dos satélites, corrige seus relógios, e retransmite os dados visando a atualização periódica das mensagens de navegação. As coordenadas das estações é determinada em relação ao sistema de referência WGS84 (world geodetic system of 84). O segmento de usuários é constituído pelos receptores GPS de diversas marcas disponíveis no mercado civil, para as mais diversas aplicações (navegação, geodésia, etc).

Para Jurschik (1997), a aquisição de dados georreferenciados para as atividades de agricultura de precisão se tornou praticável com o auxílio de sistemas de navegação por satélites como o GPS, uma vez que uma referência de posição com base em coordenadas geográficas pode ser vinculada a todos os dados coletados, como por exemplo: contorno de áreas, topografia, perfil altimétrico, tipos de solos, fertilidade dos solos, observações de peculiaridades dentro das áreas, produtividade, imagens das áreas (sensoriamento remoto).

O Sistema de Posicionamento Global ou GPS é uma ferramenta importantíssima para a agricultura de precisão, pois auxilia em suas etapas de mapeamento a campo e de aplicação localizada de insumos.

4.1.2 Sistemas de suporte à decisão

A etapa da agricultura de precisão caracterizada pelos sistemas de suporte à decisão vem a ser o conjunto de atividades que envolvem a construção de um banco de dados com informações previamente coletadas seguida de sua manipulação e tratamento que permitam a análise e identificação de zonas de manejo para a geração de mapas de prescrição para as atividades de aplicação localizada.

Para Reetz Jr. & Fixen (1999), o suporte à decisão exige um nível mínimo de dados para que decisões de manejo localizado possam ser tomadas, havendo normalmente a necessidade de informações de vários anos para que as decisões sejam realizadas com confiança. Segundo os autores, a utilização de computadores e de sistemas de informação geográfica torna mais fácil o processo que permite o manejo localizado de insumos em uma área.

Os Sistemas de Informação Geográfica - SIG (Geographical Information System - GIS) são programas computacionais utilizados para aquisição ou coleta, armazenagem, transformação, análises, interpretação e exibição de dados georreferenciados. Além disso, são capazes de possibilitar a digitalização de mapas, processamento de imagens, análises geográficas e estatísticas e exibição cartográfica de mapas (Salvador, 1999). Segundo Molin (1997b), os SIG oferecem a possibilidade de execução de operações aritméticas e lógicas por meio da sobreposição das informações contidas em diferentes camadas.

Vários programas de SIG têm sido utilizados por pesquisadores nas atividades de suporte à decisão da agricultura de precisão, estando entre os mais conhecidos o SST ou SSToolbox (SST Development Group Inc., 2001), IDRISI (Eastman, 1997), SPRING (INPE, 1999), ArcInfo (ESRI Inc., 1995) e ArcView (ESRI Inc., 1995). Salvador (2002) utilizou o sistema de informação geográfica IDRISI para as atividades de edição, classificação, manipulação, tratamento de dados, confecção e visualização, para a comparação de diferentes metodologias de mapeamento de plantas daninhas a campo. Em trabalho semelhante, Shiratsuchi (2001) mapeou a variabilidade espacial de plantas daninhas com o auxílio do SST nas atividades de interpolação do banco de semente e confecção dos mapas. O programa IDRISI foi utilizado por Stafford et al. (1996) em trabalho de desenvolvimento de um sistema portátil de mapeamento de manchas de plantas daninhas. Rodrigues (2002) utilizou o IDRISI

na avaliação da variabilidade espacial entre atributos do solo e mapas de produtividade de milho. Elias (2003) comparou os SIG SST, Arcview e ArcInfo na elaboração de mapas de resistência a penetração do solo, obtendo resultados similares para todos os programas, sendo que o ArcInfo permitiu a confecção de mapas com maior nível de detalhamento de informações. Baio (2001) avaliou a variabilidade espacial das plantas daninhas e com auxílio do programa SST obteve mapas de prescrição para a aplicação localizada de defensivos.

4.1.3 Aplicação localizada de insumos

A prática da agricultura de precisão permite a identificação de zonas de manejo a campo e a geração de mapas de prescrição para as atividades de aplicação localizada de insumos baseada na variabilidade dos fatores de produção. Segundo Molin (1997b), esta é apenas uma das maneiras de ação para o manejo da variabilidade, sendo possível classificá-las em cinco estratégias de controle: (1) homogêneo, não considera a variabilidade resultando em aplicação uniforme de insumos; (2) automático, no qual um sensor identifica o problema resultando em aplicação instantânea; (3) via mapa, pela criação de um mapa de prescrição utilizado para a aplicação realizada numa segunda etapa; (4) multivariado de variabilidade espacial, pela utilização de múltiplos mapas de variabilidade para criação de um mapa de prescrição também utilizado na futura aplicação localizada; (5) por meio da variabilidade espacial histórica, semelhante aos controles via mapa e multivariado, leva em consideração uma série histórica de eventos.

Para Antuniassi (2000), a aplicação localizada de fertilizantes tem sido utilizada com grande sucesso, podendo ser considerada um dos maiores mercados para viabilização da agricultura de precisão. Segundo Jurschik (1997), equipamentos capazes de auxiliar na aplicação localizada de sementes, fertilizantes e defensivos existem há vários anos e estão amplamente disponíveis no mercado. Para Molin (1997b), as áreas de maior potencial para o controle variado são a aplicação localizada de fertilizantes e de defensivos, seguida da aplicação de sementes para variação de população e da potencial área de controle localizado da intensidade de preparo do solo.

Para Stafford (2000), a aplicação localizada de insumos pode ser realizada com a adição de controladores e GPS em equipamentos existentes nas propriedades

(como distribuidores de fertilizantes e corretivos, pulverizadores, semeadoras). Segundo Mantovani et al. (1998), controladores são dispositivos que comandam as decisões de variação da taxa de aplicação dos equipamentos baseados em seqüência de procedimentos e cálculos (algoritmos) que relacionam os dados de entrada (sensores, mapas de prescrição, entradas via console) com os de saída na forma de tensão ou corrente elétrica, que controlam atuadores responsáveis pela quantidade de insumos aplicada.

Antuniassi (2000) ilustrou a aplicação localizada de fertilizantes e corretivos com equipamento composto por um computador de bordo, receptor DGPS e sensor de velocidade instalados em um trator puxando um adubador com atuador para a dosagem dos sólidos. Segundo Mantovani et al. (1998), os atuadores são dispositivos que respondem ao sinal dos controladores para regular a quantidade de material aplicado na área de cultivo, sendo sua ação geralmente a distensão ou contração de uma haste mecânica (atuadores lineares com cilindros pneumáticos ou hidráulicos), a rotação ou mudança de velocidade de um eixo motriz (motores hidráulicos, bombas peristálticas) e a abertura ou fechamento de uma porta ou orifício (válvula solenóide). No caso de aplicação de fertilizantes sólidos é possível variar a quantidade aplicada com uso de cilindros hidráulicos para variar a abertura do orifício de saída dos sólidos ou com uso de um motor elétrico para variar a velocidade da esteira de transporte dos sólidos, o qual também pode ser usado para variação na quantidade de sementes.

Segundo Antuniassi (2000), a aplicação localizada de defensivos pode ser realizada de duas maneiras: (1) pela aplicação em tempo real ou instantânea, na qual a detecção ou identificação do alvo é feita por sensores durante o deslocamento do equipamento de pulverização dentro da área ao mesmo tempo em que a aplicação do defensivo é realizada somente sobre os pontos desejados; (2) pela aplicação com uso de mapas de prescrição, na qual a identificação das zonas de manejo é realizada em uma primeira etapa pela coleta e análise de informações para elaboração de um mapa georreferenciado, sendo a aplicação localizada do defensivo feita em uma segunda etapa.

Para as aplicações localizadas de defensivos são necessários: (1) pulverizadores com eletrônica sofisticada, (2) computador de bordo, (3) controladores eletrônicos, (4) antena e receptor DGPS, (5) sensor de velocidade, (6) sensor de fluxo volumétrico, (7) válvulas solenóides diversas. O computador de bordo é capaz de processar os dados contidos nos mapas de prescrição estabelecendo, em tempo real, a relação entre a

posição recebida pelo GPS e a taxa de aplicação recomenda pelo mapa. Os controladores eletrônicos recebem as informações enviadas pelo computador de bordo, pelo sensor de velocidade e de fluxo volumétrico, sendo capaz de calcular e manter a correta vazão da calda aplicada. A aplicação localizada de defensivos pode ser realizada: (1) pela variação do volume de calda aplicada, (2) pela variação da dose de defensivos, (3) pela combinação das duas, ou (4) pela aplicação de taxa zero ou total num sistema liga-desliga. A variação do volume é realizada pela variação da pressão de aplicação, que pode ser realizada com um conjunto de bicos na barra (com variação máxima de 20% do volume aplicado) ou com dois conjuntos de bicos com vazões diferentes (permitindo uma ampla variação do volume aplicado). A variação da dose de defensivos é realizada pela injeção direta de um ou mais defensivos na linha de aplicação sem alterar o volume da calda aplicada. Na aplicação de taxas zero ou total o volume de calda e a dose de defensivos são mantidos constantes e a aplicação somente ocorre nos locais onde existe um alvo (como manchas de plantas daninhas, presença de insetos, etc), sendo desligada quando o pulverizador se desloca em áreas sem alvos (Paice, 1993; Stafford, 1995; Fekete, 1996; Antuniassi, 1999; Humburg, 1999b, Antuniassi, 2000).

Aplicação localizada de insumos pode ser realizada com a variação das quantidades de sementes, fungicidas e inseticidas no sulco de plantio, corretivos, fertilizantes, herbicidas, inseticidas, reguladores de crescimento, desfoliantes e outros. Segundo Stafford (1993), esta técnica permite a redução do uso de insumos e dos custos da aplicação. Bethel et al. (2003), em aplicação localizada de reguladores de crescimento em algodão utilizando duas metodologias, a primeira com taxas variáveis e a segunda com taxa zero ou total, observaram a redução na quantidade de reguladores de crescimento de 12% a 51%, respectivamente. Em trabalhos semelhantes, Lewis et al. (2002) e Lewis et al. (2003) obtiveram reduções de 22 a 40% na quantidade e de 9 a 24% nos custos de reguladores de crescimento aplicados em taxas variáveis. Dupont et al. (2000), com a utilização de sensoriamento remoto, realizaram aplicação localizada de inseticidas em área de algodão, conseguindo economia de 40 a 60% na quantidade de inseticida aplicada. Tian et al. (1999) desenvolveram um equipamento para aplicação localizada de herbicidas, confirmando a possibilidade de se obter até 50% de economia com defensivos. Esquerdo (2002), pela aplicação localizada com base no mapeamento por contorno de manchas de plantas daninhas em uma área de reforma de cana de açúcar, alcançou uma redução de 69,5% na dose do herbicida aplicado.

Com o uso da aplicação localizada com taxa variada de insumos pode ocorrer a uniformização da expressão das características tanto das plantas como do solo manejado. Dessa forma, a informação que deu origem aos mapas de prescrição para a aplicação variada tem significativa importância, uma vez que todas as futuras aplicações serão realizadas a partir dela. Sharp (2002) apresentou a comparação de imagens aéreas multiespectrais de diversas áreas antes e depois do início do manejo localizado com taxas variáveis de insumos. Seus resultados demonstram a uniformização das características expressas pelas plantas de algodão após o uso da aplicação localizada com taxas variadas de sementes, inseticidas, fertilizantes, reguladores de crescimento e desfoliantes.

4.2 A cultura do algodão

O sucesso na produção de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) depende de um manejo integrado de estratégias que reconheçam e se adaptem a características singulares da cultura (Edmisten, 2003).

O crescimento e o desenvolvimento de uma planta de algodão são singulares quando comparados a outras culturas semeadas em linhas de cultivo. O algodão é uma planta semitropical de hábito perene que tem sido melhorada para cultivo e produção como uma planta anual sob diferentes ambientes e condições de temperatura. A compreensão do padrão de desenvolvimento do algodão é muito importante para que produtores estejam bem preparados para tomarem boas decisões de gerenciamento e de manejo da cultura (Albers, 1999).

4.2.1 Características do desenvolvimento do algodão

Para Edmisten (2003), o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do algodão é extremamente relacionado à temperatura ambiental quando adequada umidade se encontra disponível no solo. Segundo Albers (1999), a temperatura determina a taxa de desenvolvimento da planta, sendo responsável pela velocidade em que a planta produz novas estruturas. O autor ainda afirma que o crescimento das plantas depende da combinação de três fatores: (1) da radiação solar, utilizada por folhas saudáveis para a produção de carboidratos,

(2) da temperatura, para um rápido desenvolvimento da planta, e (3) do sistema radicular saudável, para absorção de nutrientes necessários para a estrutura básica das plantas e para alimentação de partes em crescimento.

Segundo vários autores (Monks et al., 1996; Albers, 1999; Edmisten, 2003), o parâmetro que melhor descreve a relação entre o desenvolvimento do algodão e a temperatura é dado pelo acúmulo de unidades de graus dia equivalente ao padrão base de 60°F (DD60s ou Degree Day 60 Heat Units), sendo esta relação representada pela Equação 1.

$$DD60s = ((T_{max} + T_{min}) / 2) - 60 \quad \dots\dots\dots (1)$$

onde:

DD60s = graus dia de calor em °F, obtido pela diferença entre a temperatura média diária e a temperatura base de 60 °F;

T_{max} = temperatura máxima diária em °F;

T_{min} = temperatura mínima diária em °F.

Quanto maiores as temperaturas máxima e mínima diárias, maiores serão os valores de graus dia a serem acumulados. A mínima temperatura necessária para que as plantas de algodão cresçam é de 15,5 °C (ou sua equivalente de 60 °F). Abaixo desta, ou nesta temperatura limite, as plantas de algodão têm pequeno ou nenhum desenvolvimento. Se a temperatura diária variar entre 18,3 e 29,4 °C (respectivamente 65 e 85 °F), as plantas de algodão se desenvolvem com uma taxa de crescimento bem previsível (Albers, 1999). A mínima temperatura do solo para a germinação e emergência das sementes de algodão também coincide com a temperatura de 15,5 °C (Monks et al., 1996).

Marur & Ruano (2001) descreveram um sistema de referência (independente do genótipo, localidade e época de plantio) para a determinação dos estágios de desenvolvimento de plantas de algodão caracterizados por sua fenologia: fase vegetativa (V), produção de botões florais (B), florescimento (F) e abertura de maçãs (C). A fase vegetativa inicia-se após a emergência da plântula, sendo caracterizada pela emissão de folhas e ramos vegetativos (monopodiais) e representada por V0 a Vn, onde V0 corresponde ao período de emergência a expansão das folhas cotiledonares, V1 corresponde à emissão da primeira folha verdadeira com nervura central medindo até 2,5cm de comprimento acima de V0, e assim por

diante aplicando-se o mesmo critério até Vn. A fase de produção de botões florais, representada por B1 a Bn, tem início com o aparecimento do primeiro botão floral (B1), seguindo até Bn, onde n será o número do novo ramo reprodutivo (simpodial) com um botão floral visível em sua primeira posição frutífera. A fase de florescimento começa quando o primeiro botão floral do primeiro ramo reprodutivo se torna uma flor (F1), seguida por estágios sucessivos até Fn, representado pelo aparecimento de uma flor na primeira posição frutífera do enésimo ramo reprodutivo. Da mesma maneira, a fase de abertura de maçãs tem início com a primeira maçã aberta (C1) na primeira posição frutífera do primeiro ramo reprodutivo, sucessivamente até Cn, com maçã aberta na primeira posição do enésimo ramo simpodial.

Uma relação entre o número médio de unidades de graus dia necessários para diversos estágios de desenvolvimento do algodão para o Estado do Missouri, proposta por Albers (1999), com designação do estágio de desenvolvimento seguindo a metodologia descrita por Marur & Ruano (2001), é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Número médio de unidades de graus dia (DD60s) necessários para diversos estágios de desenvolvimento do algodão para o Estado do Missouri (Albers, 1999).

Estágio de desenvolvimento	Designação *	Graus dia (°F) (DD60s)	Data (média)
Plantio	-	0	01/maio
Emergência	V0	55	12/maio
Adição de novos nós ao caule principal	V1 a Vn	45 a 65 por nó	3 dias por nó
Primeiro botão floral	B1	500	17/junho
Primeira flor	F1	850	06/julho
‘Cut-out’ (20 nós no ramo principal, 10 a 12 ramos frutíferos efetivos)	F10 a F12	1300 a 1450	28/julho a 06/agosto
Primeira maçã aberta	C1	1700	20/agosto
Colheita	Cn	2150 a 2300	21/setembro a 01/outubro

* a designação do estágio de desenvolvimento seguiu o proposto por Marur & Ruano (2001).

Segundo Monks et al. (1996), a germinação e emergência das plântulas de algodão no Alabama normalmente ocorrem em 5 e 10 dias após o plantio. A produção de novos nós no caule principal ocorre a cada 3 ou 4 dias (50 a 55 DD60s por nó). As plantas crescem, até o aparecimento do primeiro botão floral, por cerca de 30 dias após emergência. A produção de botões florais ocorre sequencialmente na vertical (subindo pelo ramo principal, com botões florais nas primeiras posições dos ramos frutíferos) e na horizontal (caminhando pelo ramo frutífero até sua ponta, com botões florais nas primeira, segunda, terceira e outras posições de um ramo), com intervalo de 3 e 6 dias, respectivamente. Os botões florais florescem em aproximadamente 21 dias após sua formação. A abertura das flores também ocorre sequencialmente, num intervalo de 3 a 4 dias na vertical (para botões florais localizados nas primeiras posições de ramos consecutivos, de baixo para cima), e dentro de 6 dias na horizontal (para botões florais de um mesmo ramo, de dentro para fora). O pico do florescimento ocorre num período de 3 a 4 semanas após o início do florescimento, e então o número de flores começa a decrescer até ser interrompido.

O termo 'cut-out' representa o estágio final de crescimento de uma planta de algodão que ocorre pouco antes da abertura das maçãs, sendo caracterizada pela predominância de maçãs mais maduras, pela geralmente redução da presença de botões florais e flores, e pela interrupção de novos terminais de crescimento (Bacheler, 2003). Segundo Monks et al. (1996), o 'cut-out' ocorre quando flores aparecem no topo da planta, indicando o final do período de frutificação da planta de algodão. Para Ball (1998), este período está relacionado à translocação de nutrientes e demanda por fotossintéticos necessários para o desenvolvimento das maçãs.

Segundo Bacheler (2003), as flores que primeiro surgem dos botões florais tem coloração branca que tipicamente duram apenas um dia, tornando-se cor de rosa no segundo dia, e marrom nos dias subseqüentes, normalmente caindo ao se desligarem da maçã em crescimento em 3 a 5 dias. O termo 'nodes above white flower' ou nós acima da última flor branca (NAWF) é aplicado ao número de nós ou gemas encontrados no ramo principal da planta de algodão que vão desde o ramo mais próximo do ápice que contenha uma flor branca desenvolvida presente em sua primeira posição até o nó terminal da planta. De acordo com a mais recente terminologia, o algodão está se aproximando do estágio final de crescimento quando apresenta em seu ramo principal cinco nós acima da última flor branca (NAWF=5).

Para Monks et al. (1996), a quantidade de tempo entre o início do florescimento e o final da produção de flores e frutos é diretamente relacionada à quantidade e tipo de estresse sofrido pela planta. Plantas com 18 a 20 nós frutíferos com boa carga de maçãs irão interromper a produção de flores e frutos antes de plantas com poucas maçãs. O mesmo pode ocorrer com plantas com elevada deficiência nutricional e hídrica, sendo manifestada a interrupção prematura da fase reprodutiva. A formação de frutos, que geralmente requer um período de 40 a 50 dias entre as fases de florescimento até abertura de maçãs, pode vir a requer mais de 65 dias para completar as mesmas fases em condições ambientais mais frias. Ball (1998) classificou o estágio final de crescimento do algodão em três categorias: (1) fisiológico, caracterizado pelo normal desenvolvimento da planta que atinge o estágio final de crescimento com média de 5 NAWF; (2) sazonal, quando as restrições climáticas de baixas temperaturas determinam a interrupção do crescimento da planta; e (3) prematuro, quando em condições de estresse elevado o crescimento da planta é interrompido muito cedo.

Edmisten (2003) descreveu, para o Estado da Carolina do Norte, que uma quantidade ótima de 900 DD60s desde o florescimento é normalmente necessária para a completa maturidade de uma maçã. Embora a maturidade seja mínima a 750 DD60s, a produtividade e qualidade geral das fibras de algodão não são seriamente afetadas em função de pequena proporção de maçãs que são produzidas no final do ciclo da cultura. Segundo Ball (1998), estudos mostraram a necessidade de um acúmulo de 350 DD60s após o estágio final de crescimento fisiológico ou sazonal para abertura das maçãs.

4.2.2 Monitoramento dos atributos físicos das plantas de algodão

O monitoramento das plantas pode ser definido como uma série de mensurações dos atributos físicos das plantas ou cultura, normalmente realizada sequencialmente durante o desenvolvimento da cultura (Ball, 1998). Pela quantificação de diversos parâmetros de desenvolvimento das plantas de algodão, agricultores e consultores podem identificar vários problemas e oportunidades de manejo da cultura (Albers, 1999). Os agricultores devem monitorar as áreas de algodão semanalmente durante toda a safra para identificar infestações de insetos, problemas de fertilidade, a necessidade de irrigação, infestações de plantas daninhas, e outras situações potencialmente limitantes para o bom

desenvolvimento da cultura, a fim de manejar rapidamente as condições oscilantes para garantir a máxima produtividade (Monks et al., 1996). Em função das características da cultura do algodão e de seu monitoramento semanal é possível identificar a desuniformidade das características de vigor entre plantas dentro de uma mesma área e viabilizar a realização de aplicações localizadas de insumos em taxas variáveis para uniformizar o desenvolvimento da cultura (Sharp, 2003).

O monitoramento de plantas é um termo geral para a avaliação metódica do vigor e do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das plantas de uma área e pode ser realizado em duas fases: (1) durante toda a condução da cultura, para permitir a correção de problemas durante a safra, e (2) no final do ciclo da cultura, antes da aplicação dos desfoliantes, para mapear a resposta das plantas ao estresse sofrido durante a safra, e com isso, fornecer informações para o planejamento da cultura para o ano seguinte (Monks et al., 1996). Segundo Sharp (2003), os mapas dos atributos das plantas de algodão realizados no fim da safra, por ele denominado ‘final plant map’, permitiram a identificação da variabilidade espacial da área expressa pela desuniformidade das características das plantas encontradas em diferentes regiões da área.

Durante a condução da cultura, os períodos de amostragem das características das plantas de algodão mais importantes são os realizados: (1) antes do florescimento, fase de produção de botões florais, (2) no florescimento, e (3) após o florescimento, fase de abertura de maçãs (Albers, 1999; National Cotton Council, citado por Monks et al., 1996). As medidas coletadas antes do florescimento são importantes para a identificação da velocidade de crescimento das plantas e para a correção de problemas iniciais que podem reduzir o desenvolvimento de nós no caule principal e da área foliar das plantas. Durante a fase de florescimento, o objetivo principal é observar a retenção de frutos e a velocidade de desenvolvimento das plantas em direção a seu estágio final de crescimento. Na fase de abertura das maçãs, as medidas coletadas procuram auxiliar na determinação do melhor momento para a colheita (Albers, 1999).

Durante o monitoramento, com a utilização de uma planilha ou formulário, podem ser mensurados vários atributos físicos das plantas, diversas características da cultura, outras informações da área, como por exemplo: a data da coleta, o local, o estande de plantas, a altura das plantas, o número total de nós no caule principal, o número do nó do

primeiro ramo frutífero, o número de botões florais presentes na primeira posição de ramos frutíferos, o número total de ramos frutíferos, o número de nós acima da última flor branca, o número total de maçãs, o número de maçãs presentes na primeira posição de ramos frutíferos, o número de nós acima da última maçã aberta, o número total de maçãs abertas. Segundo Bachelier (1994), vários sistemas de monitoramento focalizam apenas as informações obtidas na primeira posição dos ramos, não levando em consideração a compartimentalização e comparação com outras posições nos ramos.

O estande de plantas de uma área, representado pelo número de plantas por unidade de comprimento, pode expressar a uniformidade da semeadura, bem como o vigor das sementes (Gwathmey, citado por Reed, 2002) como resultado da germinação e emergência das plântulas. Tugwell et al. (1998) sugeriu a contagem do número de plantas em 91,4 cm de cada linha de plantio, realizada em 24 linhas consecutivas para obtenção de média de estande para cada ponto amostral coletado, sendo recomendado 4 pontos amostrais por área.

A altura e o número de nós no caule principal das plantas de algodão estão diretamente relacionados ao vigor e ao estresse das plantas (Albers, 1999). A avaliação da altura das plantas durante o decorrer da cultura e/ou sua relação ao número de nós no caule principal pode ser considerada como um índice de vigor das plantas (Ball, 1998). Albers (1999) propoz a determinação do índice altura/nós (HNR ou 'height-to-node-ratio'), que mede a distância média entre nós, pela divisão entre a altura da planta e o número total de nós no caule principal, medidos a partir do nó cotiledonar (número zero na contagem dos nós) até o nó apical da última folha totalmente aberta, a ser realizada em 4 pontos amostrais por área, com 5 plantas por ponto. Monks et al. (1996), em função da fase do monitoramento, calcularam o mesmo índice de duas formas: (1) quando realizado no final da safra, da mesma maneira que Albers (1999), e (2) durante a condução da cultura, ao dividir por 5 a medida da distância entre o nó apical da última folha totalmente aberta (contado como zero) e 5 nós abaixo dele, realizadas em 10 a 20 plantas por área.

Segundo Albers (1999) e Monk et al. (1996), valores médios do índice altura/nós, observados em condições de umidade e temperatura adequadas, podem ser utilizados como um guia de crescimento das plantas, como segue: (1) na fase vegetativa, 12,7 a 19,1 mm por nó, (2) na fase inicial de produção de botões florais, 19,1 a 30,5 mm por nó, (3) na fase final de produção de botões florais, 30,5 a 43,2 mm por nó, e (4) na fase inicial de

florescimento, 43,2 a 50,8 mm por nó. Se o valor do índice HNR medido estiver abaixo da referência, as plantas serão pequenas para sua idade como resultado de algum estresse sofrido pelas plantas, o qual pode ser, entre outros, ocasionado por deficiência hídrica ou nutricional, presença de plantas daninhas, insetos, compactação do solo, pouca drenagem. Se o valor do índice HNR medido estiver acima da referência, as plantas serão muito altas para sua idade, possivelmente em função de excessivo uso e quantidade de nitrogênio, podendo necessitar a aplicação de reguladores de crescimento para controlar o desenvolvimento vegetativo das plantas e estimular o desenvolvimento reprodutivo.

O número do nó do primeiro ramo frutífero permite verificar se o início do desenvolvimento reprodutivo está ocorrendo de forma adequada em relação ao tempo (Albers, 1999). Esta medida deve ser feita pela contagem do número de nós no caule principal, medidos a partir do nó cotiledonar (contado como zero) até o nó do primeiro ramo reprodutivo. O autor descreveu como normal para o algodão cultivado no Missouri a presença do primeiro ramo frutífero entre o quinto e sexto nó do ramo principal. A formação desse ramo ocorrendo abaixo do quinto nó pode significar a interrupção precoce do crescimento da planta por possível redução de área foliar, suporte para a formação de frutos. Se o ramo reprodutivo se formar no sétimo ou oitavo nó, o ciclo reprodutivo estará atrasado, podendo resultar na impossibilidade de maturação das maçãs produzidas no final da safra.

O número de botões florais presentes na primeira posição de ramos frutíferos, juntamente com o número total de ramos frutíferos, permite o cálculo da porcentagem de retenção de botões florais, resultado da divisão do número de botões florais presentes na primeira posição de ramos frutíferos pelo número total de ramos frutíferos (Edmisten, 2003). O mesmo raciocínio pode ser usado para o cálculo da porcentagem de retenção de maçãs. A redução na retenção de botões florais e maçãs pode ser resultado de danos causados por insetos, condições climáticas de nebulosidade, altas temperaturas, deficiência hídrica, danos foliares, ou até mesmo excesso de carga de maçãs. Segundo Albers (1999), as plantas de algodão normalmente deixam cair seus botões florais quando o suprimento de carboidratos sofre uma redução. Se a perda de botões florais não for suficiente, as plantas irão deixar cair pequenas maçãs, porém as plantas nunca irão derrubar as flores e raramente irão deixar cair maçãs com mais de 7 dias de idade.

O número de nós acima da última flor branca (NAWF), medido desde o ramo mais próximo do ápice com flor branca em sua primeira posição até o nó terminal da planta com folha totalmente aberta, é uma medida acurada da interrupção do crescimento das plantas. Segundo Albers (1999), nas condições do Missouri, quando o algodão atinge seu pico reprodutivo, as plantas não conseguem suprir as demandas energéticas para o crescimento vegetativo e reprodutivo, então as plantas inicialmente diminuem a adição de novos nós no ramo principal (NAWF ao redor de 8 ou 9) até a sua interrupção (NAWF ao redor de 4 ou 5). Para Monks et al. (1996), plantas de algodão em fase inicial de florescimento com NAWF igual a 7 apresentam desenvolvimento reprodutivo reduzido por alguma fonte de estresse sofrido pelas plantas; com NAWF igual a 8, o desenvolvimento é normal; para NAWF igual a 9, a cultura tem potencial produtivo acima do esperado pela média; e com NAWF igual a 10, o desenvolvimento é muito vigoroso ou existe baixa retenção de frutos, indicando a possível necessidade de uso de reguladores de crescimento.

O número de nós acima da última maçã aberta (NACB) é determinado pela contagem do número de nós entre o ramo mais próximo do ápice com a última maçã aberta e o ramo mais próximo do ápice com a última maçã possível de ser colhida (Albers, 1999). Para Ball (1998), maçã possível de ser colhida é a maçã madura ou imatura que irá abrir antes do final do ciclo da cultura, permitindo sua colheita mecânica. Segundo Albers (1999), quando o NACB fica ao redor de 4 a 6, as aplicações de desfoliantes podem ser realizadas com risco de perda de produtividade máxima de 2%. A contagem do número total de maçãs fechadas e de maçãs abertas é recomendada para o cálculo da porcentagem de maçãs abertas (Edmisten, 2003), sendo possível evitar perdas de produtividade e da qualidade das fibras pela aplicação de desfoliantes quando mais de 60% das maçãs estiverem abertas. Monks et al. (1996) sugeriram a utilização de um método tradicional que envolve o corte das maçãs por uma faca afiada para auxiliar na determinação da maturidade das maçãs; se a maçã for facilmente cortada e suas sementes apresentarem um gel em seu interior, a maçã está imatura; se a maçã não puder ser cortada sem que as fibras se desfiem e suas sementes apresentarem início de escurecimento de seu tegumento, a maçã está madura. O número total de maçãs também indica a carga total de frutos de uma planta de algodão. Quanto maior o peso e número de maçãs viáveis de uma planta, maior será a produtividade de algodão.

O monitoramento das plantas de algodão requer tempo e esforço intenso para a realização da coleta de diversos parâmetros a campo e da interpretação dos mapas e/ou planilhas produzidas. Estudos atuais têm demonstrado que a coleta de alguns poucos parâmetros pode ser suficiente para fornecer rapidamente diversas informações para permitir o manejo da cultura (Albers, 1999). Vários trabalhos vêm sendo realizados com a utilização do programa Cotman (Cotman, 1999), pois este requer o monitoramento de poucos atributos físicos das plantas a campo, interpreta as informações em tempo real e permite a tomada de decisão sobre o manejo da cultura a ser adotado, podendo auxiliar no controle da irrigação (Teague et al., 1999; Kelley, et al., 2000), na aplicação de nitrogênio (Stewart et al., 2000; Herbert et al., 2001), no controle de insetos e interrupção das aplicações de inseticidas (Benson et al., 1999; Baugh et al., 2001; Kharboutli & Allen, 2001; Mcfall et al., 2003), no uso de reguladores de crescimento das plantas (Sharp, 1999; Oosterhuis et al., 1999; Tugwell et al., 2000; Robertson & Weatherford, 2003), na aplicação de desfoliantes e produtos que auxiliam a abertura das maçãs (Fromme, 1999; Benson et al., 2000; Phipps et al., 2002).

O componente ‘Squareman’ do programa Cotman (Cotman, 2003) é utilizado para monitorar a retenção de botões florais e o estresse das plantas, enquanto que o componente ‘Bollman’, a produção de maçãs e também o estresse das plantas. Ambos os componentes são baseados numa curva padrão de desenvolvimento, na qual a produção de botões florais deveria começar 35 dias após a semeadura (d.a.s.), com início do florescimento 25 dias mais tarde (60 d.a.s.), com interrupção fisiológica do crescimento aos 80 d.a.s. quando a média do número de nós acima da última flor branca é igual a 5. O programa requer uma única contagem do estande das plantas e do número do nó do primeiro ramo frutífero, monitoramento semanal da posição e presença de botões florais na primeira posição de ramos frutíferos, da altura das plantas e do número de nós acima da última flor branca, e o acompanhamento diário no final do ciclo da cultura das temperaturas máximas e mínimas diárias. Com estas informações o programa é capaz de fornecer em tempo real a retenção de botões florais, população de plantas e frutos por área, gráficos com o desenvolvimento da cultura, data de floração para obtenção efetiva de maçãs, datas em que as maçãs estarão protegidas dos danos causados por insetos, datas para início de aplicação de desfoliantes, além da quantidade de graus dias de calor acumuladas diariamente.

Diversos pesquisadores têm utilizado o programa Cotman na avaliação de critérios de amostragem e monitoramento a campo (Tugwell et al., 1998; Cochran et al., 1999; Tugwell et al., 1999), na avaliação do crescimento de novos cultivares convencionais e transgênicos para diferentes regiões (Oosterhuis et al., 2001; Jarrell et al., 2002; Jarrell et al., 2003), além da avaliação do próprio programa e seus componentes (Benson et al., 1999; Sites et al., 1999).

4.3 Sensoriamento remoto multiespectral

Sensoriamento remoto é a técnica de obter informação sobre um objeto através de um dispositivo chamado sensor que não está diretamente em contato com o objeto (Elachi, citado por Schlemmer et al., 1999). O autor forneceu um exemplo simples que ocorre quando os olhos sentem a luz refletida de um objeto e o cérebro interpreta a informação. Neste caso os olhos são os sensores ou detectores remotos e o cérebro é o computador que dá sentido ao que foi detectado.

As técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas por vários anos pelos órgãos militares e outras agências governamentais americanas com diversos propósitos que incluem aqueles relacionados à agricultura, como avaliação do desenvolvimento das culturas e sanidade de plantas (Leonard et al., 2003). Atualmente estas ferramentas contam com acesso público facilitado, ao lado de sistemas de posicionamento globais baratos e comercialmente disponíveis, que criam diversas oportunidades à intensificação de pesquisas com aplicação direta aos sistemas de produção agrícola.

Para Leonard et al. (2003), os métodos de sensoriamento remoto e seus produtos podem incluir primitivos desenhos do objeto de estudo, imagens de radares, fotografias, videografia, bem como o sensoriamento multiespectral, hiperespectral ou termal realizado por plataformas aéreas como aeronaves e satélites. Segundo Antunias (1998) é possível instalar câmeras analógicas ou digitais para processos de videografia ou fotografia em diversas plataformas aéreas como: aviões (Broulik et al., 1999; Rew et al., 1999; Seal et al., 2001), balões (Thornton et al., 1990) e aeromodelos rádio controlados (Stafford & Benlloch, 1997; Salvador, 1999). Segundo Schlemmer et al. (1999), as informações obtidas pelo sensoriamento remoto podem ter diversos formatos de ondas eletromagnéticas, sendo o

principal foco de uso do sensoriamento remoto na agricultura a interação da energia eletromagnética ou espectro eletromagnético das plantas e do solo.

4.3.1 Considerações sobre o espectro eletromagnético e suas aplicações

A energia ou radiação eletromagnética emitida ou absorvida por um corpo pode ser dividida arbitrariamente em regiões ou espectro eletromagnético (Figura 1). Esta radiação tem seu comprimento de onda medido pela distância entre duas cristas adjacentes, expresso em unidades métricas, normalmente micrômetros (μm) ou nanômetros (nm). Entre as porções do espectro eletromagnético estão os raios gama, os raios-X, a radiação ultravioleta, a luz visível, a radiação infravermelha, as microondas, as ondas de rádio, cada uma representada por diferentes comprimentos de onda (Sharp, 2002).

Os objetos ou sensores que emitem energia são considerados ativos, e os que absorvem e refletem esta energia, passivos. A maior parte da energia solar disponível na superfície terrestre geralmente tem seu comprimento de onda variando entre 0,3 a 3,0 μm . A porção do visível cobre apenas uma pequena porção de todo o segmento da luz solar, com ondas de comprimento variando de 0,4 a 0,7 μm . Já a maior parte da energia emitida ou refletida por objetos na superfície terrestre ocorre normalmente entre 3,0 e 14,0 μm (Schlemmer et al., 1999). O espectro do visível é composto pelas bandas do azul (B) com comprimento de onda de 0,4 a 0,5 μm , do verde (G) com 0,5 a 0,6 μm e do vermelho (R) com 0,6 a 0,7 μm . A porção do infravermelho tem comprimento de onda variando de 0,7 a 1000 μm e pode ser dividida em infravermelho próximo (NIR) com 0,7 a 1,3 μm , infravermelho médio (MIR) com 1,3 a 3,0 μm e infravermelho distante (FIR) com 3,0 a 1000 μm (Sharp, 2002).

Ao chegarem a superfície terrestre, parte dos raios solares é absorvida, podendo ser reemitida na forma de radiação termal, enquanto outra parte dos raios solares é refletida. O sensoriamento remoto é capaz de mensurar as radiações eletromagnéticas emitidas e refletidas pelos objetos e com isso identificá-los (Sharp, 2002). Schlemmer et al. (1999) descreveram como recentes aplicações de sensoriamento remoto a utilização de métodos de comparação da reflectância de um objeto ou superfície em estudo com a reflectância de uma superfície conhecida, como por exemplo o estudo da eficácia de um tratamento de fertilizantes

ou variabilidade espacial de uma área pela comparação de sua reflectância espectral com a de uma área de referência já conhecida.

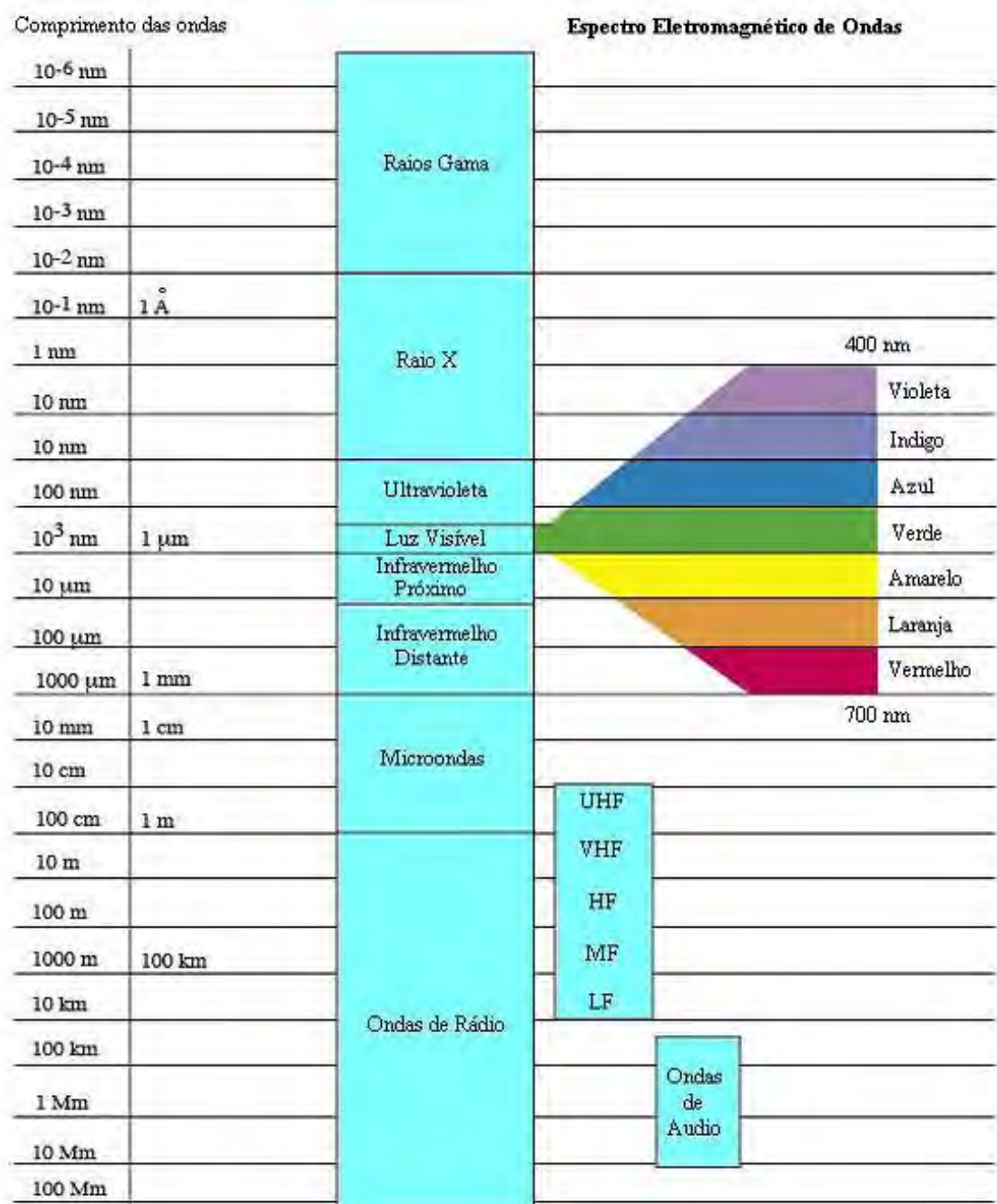


Figura 1 – Representação gráfica das regiões do espectro eletromagnético (adaptado de CASSINI UVIS, 2005).

A assinatura espectral de um alvo qualquer, como um objeto, planta, água, solo, é uma curva característica própria que relaciona a sua reflectância para cada região do espectro eletromagnético (Baio, 2001). A intensidade da reflectância de um corpo pode ser mensurada pela intensidade de brilho que este corpo apresenta em cada banda ou região do espectro eletromagnético, numa escala de 0 a 255. Numa imagem em preto e branco, o valor zero seria preto, o valor 255 seria branco, e os valores intermediários, uma escala de cinza. O valor da intensidade de brilho também pode ser chamado de número digital (DN ou 'digital number'). A assinatura espectral pode ser descrita como o conjunto de números digitais expresso para cada uma das bandas e porção do espectro eletromagnético estudado, sendo assim possível identificar quaisquer alvos com o uso de imagens multiespectrais (Sharp, 2002).

A reflectância nas bandas do verde e do vermelho está normalmente associada com as clorofilas, enquanto que a reflectância da região do infravermelho próximo está fortemente relacionada com a estrutura celular e cobertura foliar das culturas (Schlemmer et al., 1999). As folhas são verdes por refletirem a maior parte da luz verde, absorvendo a energia das outras porções do visível. Plantas saudáveis normalmente refletem grande parte da radiação da região do infravermelho (Sharp, 2002).

Segundo Bajwa et al. (2001), diferentes tipos de solos apresentam diferentes características de reflectância e estas características estão relacionadas aos fatores de fertilidade do solo (atributos químicos do solo). Os autores ainda afirmaram que o sensoriamento remoto multiespectral tem a capacidade de identificar variações na fertilidade do solo dentro de uma área e com isso auxiliar nas decisões de manejo localizado de insumos. Também é comum a aplicação do sensoriamento remoto na identificação de zonas de manejo baseadas em classes de coloração do solo (atributos físicos do solo). Estas classes podem ser delineadas com auxílio de técnicas de classificação existentes em programas com base em SIG (Schlemmer et al., 1999).

Outra aplicação comum é o uso de índices de vegetação com base na combinação de comprimentos de bandas, sendo os mais comuns desses índices os que comparam porções do espectro do visível (nas bandas do vermelho e verde) com o infravermelho próximo. Estas combinações de comprimentos de onda são extremamente

sensíveis às variações na cobertura foliar das culturas e condição de vigor da vegetação (Schlemmer et al., 1999).

O Índice de Vegetação com Diferença Normalizada ou NDVI (normalized difference vegetation index) é o índice de vegetação mais utilizado em pesquisas com uso de imagens multiespectrais, tendo sua representação gráfica descrita em diversos trabalhos (Li et al., 2001; Thomasson et al., 2003; Villarroel et al., 2003), como mostra a Equação 2.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

onde:

NDVI = Índice de Vegetação com Diferença Normalizada, adimensional, varia de -1 a +1;

NIR = região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, varia de 0 a 255;

R = banda do vermelho da região do visível do espectro eletromagnético, varia de 0 a 255.

4.3.2 Considerações sobre a resolução de imagens multiespectrais

Segundo Schlemmer et al. (1999), a utilização das técnicas de sensoriamento remoto leva em consideração o entendimento dos limites e possibilidades de uso dessa ferramenta e de fatores relacionados à resolução (1) espectral, (2) espacial e (3) temporal. Para os autores a resolução espectral diz respeito ao tamanho das bandas do espectro eletromagnético utilizado; ela é importante para o desenvolvimento de índices de vegetação, pois se as bandas escolhidas tiverem um comprimento de onda variando entre um trecho muito largo do espectro eletromagnético, as exclusivas características de reflectância associadas à vegetação podem ser degradadas; da mesma forma, se a seleção espectral for muito estreita, o resultado pode ter mais ruído que sinal, o que pode levar à falsas interpretações.

A resolução espacial de uma imagem é definida como a área no campo que pode ser representada por um único elemento de imagem ou 'pixel' (picture element). O tamanho do pixel na imagem deve coincidir com a necessidade do trabalho ou sua aplicação, não sendo menor do que o tamanho mínimo do objeto em estudo (Schlemmer et al., 1999). Uma imagem com resolução espacial de 1m² terá a reflectância de uma área a campo correspondente a 1m x 1m integrada com um único valor, sendo que neste caso o tamanho ou

largura do pixel corresponde a 1m. Se a imagem tiver resolução de 30m^2 , o valor integrado da reflectância expressa para a unidade de pixel será correspondente a uma área de 5m x 6m (Clay & Johnson, 1999). Imagens de satélite tem pixel de tamanho elevado e com isso imagem de baixa resolução, porém cobrem áreas enormes com uma única imagem. Este tipo de resolução espacial é muito ruim para a tomada de decisão de manejo dentro de um campo agrícola. Imagens aéreas podem ser realizadas em diversas altitudes dependendo da resolução necessária (Lamb et al., 1999). A ótima resolução espacial que deve ser considerada para trabalhos relacionados à agricultura de precisão pode ser determinada pela largura dos implementos agrícolas utilizados ou ser baseada no tamanho do menor objeto que precisa ser identificado na área (Schlemmer et al., 1999).

Por resolução temporal entende-se a aquisição de imagens sucessivas de um mesmo local ou objeto com o passar do tempo. Imagens aéreas realizadas com câmeras montadas em aeronave oferecem grande flexibilidade de datas para a aquisição das imagens, com dependência da disponibilidade da aeronave e das condições climáticas locais. Já os satélites apresentam como desvantagens a necessidade de dias abertos sem núvens para obter imagens de qualidade e a baixa flexibilidade por terem um ciclo fixo de repetição que varia de poucos dias até tantos quanto 16 dias (Schlemmer et al., 1999).

4.3.3 Tipos de sensores remotos com aplicações na agricultura

Os sensores mais comuns com aplicações na agricultura são normalmente utilizados em plataformas aéreas, podendo ser agrupados como fotográficos e não fotográficos (Schlemmer et al., 1999). Os autores realizaram este trabalho para comparar as vantagens e desvantagens entre estes grupos de sensores, sendo a descrição destes apresentada a seguir.

Sensores fotográficos podem ser considerados como uma malha de minúsculos detectores da energia eletromagnética com espectro variando de 0,3 a $0,9\mu\text{m}$. Para filmes branco e preto, detectores individuais são grãos de halóide de prata em emulsão do filme. Para os coloridos, os filmes não contêm prata, sendo a imagem criada quando a luz interage com a química do filme, absorvendo parte dos pigmentos amarelo, magenta e ciano para geração das diversas cores. As vantagens destes sensores são a elevada resolução espacial

e o baixo custo, tendo como desvantagens (1) a necessidade de calibração periódica para cada filme, (2) a captura de pequeno número de bandas do espectro eletromagnético (3) com porções largas de comprimentos de onda, e (4) a descrição qualitativa das condições da área.

Sensores não fotográficos são leitores espectrais ('scanner') representados por dispositivos não fotográficos que permitem a captura de diversas bandas do espectro eletromagnético. Os sensores multiespectrais coletam porções largas e discretas de comprimentos de onda de regiões estratégicas do espectro eletromagnético, enquanto que os sensores hiperespectrais capturam porções estreitas e contínuas de comprimentos de onda de regiões consecutivas e específicas do espectro eletromagnético (Figura 2). Os sensores não fotográficos medem a intensidade da energia refletida e armazenam a informação no formato digital. No sistema multiespectral o número digital de cada pixel da imagem representa a energia refletida de uma parte da área no campo, dependendo de sua resolução espacial. As vantagens destes sensores são: (1) a simples calibração dos sensores, (2) a captura de diversas bandas do espectro eletromagnético (3) com porções estreitas de comprimentos de onda, e (4) a coleta de informações no formato digital, pronto para análise e classificação de maneira automática.

Muitos trabalhos sobre a utilização de sensores remotos multiespectrais na agricultura têm sido publicados. Em grande parte destes trabalhos as plataformas utilizadas são satélites, em outra, aeronaves. A resolução espectral e espacial também variam em função dos sensores e plataformas utilizadas, como é observado no Quadro 2. Tais variações ocorrem devido as diferentes aplicações de uso das imagens geradas. Dalsted et al. (2003) realizaram um trabalho de seleção do satélite mais apropriado para as diferentes aplicações do sensoriamento remoto existentes dentro da agricultura de precisão com base na resolução das imagens, nas bandas espectrais necessárias, na urgência, no custo e nos objetivos envolvidos. O trabalho permitiu a comparação entre diversos produtos (imagens) fornecidas pelos principais satélites atualmente disponíveis, entre eles o Landsat, IKONOS, QuickBird, SPOT, ASTER-Terra, MODIS-Terra.

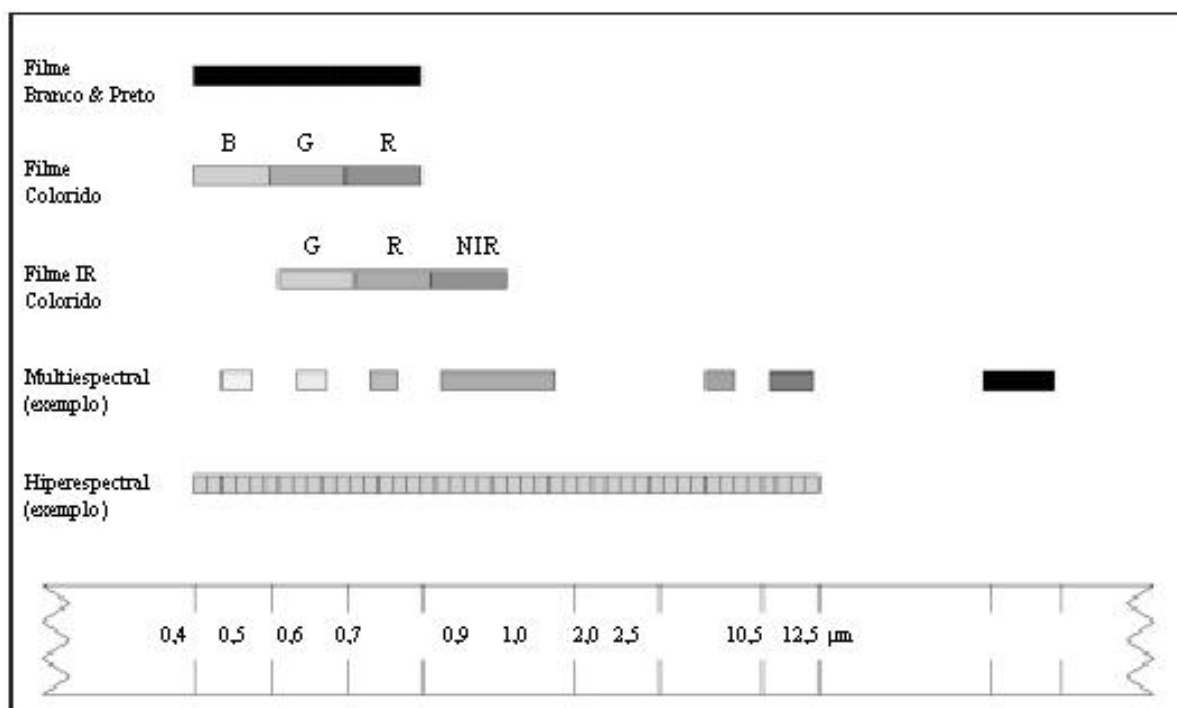


Figura 2 – Representação gráfica das regiões do espectro eletromagnético coletadas por sensores fotográficos e não fotográficos (adaptado de Schlemmer et al., 1999).

Quadro 2 – Exemplos de sensores, plataforma e resolução espectral e espacial utilizados por alguns autores em trabalhos de sensoriamento remoto aplicados na agricultura.

Sensores ou equipamentos	Plataforma	Resolução Espectral (em nm)	Resolução Espacial (em m)	Autores
ASTER	satélite	VNIR (bandas 1 - 3)	15	Ojala et al., 2003
		SWIR (bandas 4 - 9)	30	
		TIR (bandas 10 - 14)	90	
AVNIR	aeronave	400 – 1100	0,8	Ojala et al., 2003
AVIRIS	aeronave	400 – 2500	4 - 20	Ojala et al., 2003
IKONOS pancromático e multiespectral	satélite	450 - 900 (pan)	1 - 4	Ojala et al., 2003
		450 - 520 (B)		
		520 - 600 (G)		
		632 - 698 (R)		
		757 - 853 (NIR)		
SAMRSS multiespectral	aeronave	545 - 555 (G)	1 - 2	Ojala et al., 2003
		675 - 685 (R)		
		830 - 870 (NIR)		
		8 - 14 μ m (IRtermal)		
QuickBird multiespectral	satélite	445 - 900 (pan)	0,6 - 2,4	Ojala et al., 2003
		450 - 520 (B)		
		520 - 600 (G)		
		630 - 690 (R)		
		760 - 900 (NIR)		
GeoVantage	aeronave	440 - 460 (B)	0,5	Thomasson et al., 2003
		540 - 560 (G)		
		640 - 660 (R)		
		830 - 870 (NIR)		
GeoVantage	aeronave	410 - 490 (B)	0,5	Villarroel et al., 2003
		510 - 590 (G)		
		610 - 690 (R)		
		800 - 900 (NIR)		
ITD RDACS	aeronave	535 - 545 (G)	2	Bethel et al., 2002 Fridgen et al., 2002 Seal et al., 2001
		690 - 700 (R)		
		835 - 845 (NIR)		
Duncan 2100	aeronave	540 - 560 (G)	1 - 2	Sudbrink Jr. et al., 2002
		660 - 680 (R)		
		830 - 870 (NIR)		

4.3.4 Interpretação e classificação das imagens multiespectrais

Para Loch (2001), fotointerpretação é definida como o ato de examinar e identificar objetos em fotografias aéreas (ou outras imagens) e determinar o seu significado. Na interpretação visual o intérprete dispõe de uma imagem e dela extrai o que lhe interessa. A fotointerpretação visual é mais acessível a qualquer tipo de intérprete, pois basta que ele tenha uma imagem e, evidentemente, olhos para analisá-la. A interpretação automática pode ser feita por analisadores de imagens ligados a computadores preparados para analisar dados já prontos na forma digital. Os processos de interpretação automática podem ser agrupados em duas categorias: os supervisionados e os não supervisionados. Na interpretação supervisionada há contínua intervenção do intérprete, que modifica, sempre que necessário, a classificação efetuada. A interpretação será fundamentada nas regras de decisão estabelecidas com base nas áreas determinantes. Na interpretação não supervisionada, a imagem é classificada de acordo com a semelhança espectral dos diferentes tons de cinza, sendo o resultado um mapa que será mais tarde conferido com os trabalhos de campo e então corrigido.

Yang et al. (2000) obtiveram imagens aéreas multiespectrais de um campo e, por processos de classificação não supervisionada, utilizaram o índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) para realizar a classificação da área em zonas de espectro homogêneo. Como resposta concluíram que os valores de NDVI obtidos pelas imagens tiveram um bom grau de correlação com o mapa de produtividade da cultura.

Villarroel et al. (2003) avaliaram o potencial de uso do sensoriamento remoto pelo uso de imagens aéreas multiespectrais na detecção e mapeamento de plantas daninhas em áreas de algodão. Foram coletadas imagens aéreas em duas ocasiões com o sistema GeoVantage nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (respectivamente, $450 \pm 80\text{nm}$, $550 \pm 80\text{nm}$, $650 \pm 80\text{nm}$, $850 \pm 100\text{nm}$) com resolução de 0,5 metro. As parcelas experimentais foram delineadas com o uso do mapa de vegetação gerado pela imagem multiespectral do ano anterior, sendo dividido em três categorias ou classes de NDVI, sendo elas baixo, médio e alto NDVI. O processo levou em consideração a coleta semanal a partir do início do período vegetativo de atributos a campo, os quais incluíram mapeamento de atributos das plantas, porcentagem de desfolha, estante das plantas, danos causados por insetos, incidência de doenças, taxa de competição com plantas daninhas.

Com o uso de um sistema de informação geográfica (SIG) pela utilização de classificação supervisionada foi possível extrair os atributos que representavam plantas daninhas pela digitalização manual das manchas localizadas na imagem multiespectral para que o programa pudesse identificar características semelhantes em outros locais da imagem para mapear as plantas daninhas. Estes atributos foram representados pelo número digital (DN) expresso em cada banda do espectro eletromagnético para cada alvo. Os resultados do trabalho mostraram padrões de crescimento distintos entre o algodão e as plantas daninhas, tendo na comparação dos mapas de vegetação pelo NDVI uma excelente ferramenta na separação das espécies. O número digital para as bandas do azul, verde e vermelho entre algodão e plantas daninhas não foi eficiente na discriminação entre elas, embora tenham mostrado um padrão distinto entre solo e água. Já o DN com base no NIR permitiu a clara diferenciação entre algodão, plantas daninhas, solo exposto e água. Os autores comentaram que as propriedades da reflectância da maioria das folhas verdes são similares devido a sua similar composição química e estrutura foliar. Mesmo assim é possível diferenciar as plantas daninhas das plantas cultivadas pelo seu padrão de crescimento e desenvolvimento durante o passar da produção. É possível extrapolar com base nestas observações que também é possível identificar diferenças entre características de vigor entre plantas da mesma cultura, podendo manejá-la de modo variável dentro da área.

Para Dalsted & Queen (1999), a interpretação visual no sensoriamento remoto juntamente com confirmações feitas a campo é, provavelmente, a melhor maneira de se compreender o que uma imagem revela, sua utilização e aplicações na agricultura.

4.3.5 Aplicações das imagens aéreas multiespectrais em áreas de algodão

Ojala et al. (2003) apresentaram os resultados de um projeto multidisciplinar envolvendo diversas entidades governamentais e empresas prestadoras de serviços comerciais na área de sensoriamento remoto com o objetivo de desenvolver, testar, demonstrar e adaptar tecnologias de sensoriamento na produção de algodão em campos experimentais na Califórnia. Foram coletadas desde imagens multiespectrais até imagens hiperespectrais e infravermelho termal com uso de imagens aéreas e de satélites. As imagens aéreas multiespectrais foram adquiridas pelo sistema de câmeras SAMRSS (Shafter Airborne Multispectral Remote Sensing System) montados em uma aeronave Cessna com calibração

para obter as bandas espectrais do verde, vermelho e infravermelho próximo ($550 \pm 5\text{nm}$, $680 \pm 5\text{nm}$, $850 \pm 20\text{nm}$, respectivamente), com resolução da imagem de 1 a 2 metros. Já as imagens multiespectrais realizadas por satélite (QuickBird) obtiveram as bandas espectrais do verde, vermelho e infravermelho próximo (520 a 600nm, 630 a 690nm, 760 a 900nm, respectivamente), com resolução de 2,4 m. Um processamento automatizado de calibração e georreferenciamento das imagens foi utilizado para reduzir o tempo e o trabalho necessário de processamento das imagens e criação de mapas índices de vegetação como o NDVI. As imagens foram usadas para (i) determinar doses ou taxas para aplicação localizada de insumos como regulador de crescimento (Pix), nitrogênio, inseticidas, sementes, (ii) estimar a produtividade da cultura, (iii) estimar as propriedades físicas e químicas do solo, (iv) identificar zonas de estresse por nitrogênio, água, insetos, e outros, (v) assistir o calendário de irrigação. O trabalho demonstrou como a tecnologia da Agricultura de Precisão auxiliada pelo sensoriamento remoto pode ser usada num gerenciamento de decisão mais eficiente e efetivo, incluindo aplicações localizadas em taxas variadas de insumos em áreas de produção comercial.

De acordo com Yang et al. (2001), imagens aéreas multiespectrais têm a capacidade de fornecer informações contínuas e estreitas entre as bandas espectrais nas regiões do espectro eletromagnético do visível, infravermelho próximo (near-infrared, NIR) e infravermelho médio (mid-infrared, MIR). Os autores realizaram estudo com uma câmera digital infravermelha colorida para adquirir imagens aéreas durante três fases da cultura do algodão: antes da floração, na produção de maçãs e na maturação das maçãs; também foram realizadas observações no campo sobre as plantas, sendo possível concluir que o uso de imagens pode ser útil no mapeamento de atributos físicos das plantas e sua produtividade, sendo este sistema eficaz na determinação de zonas de manejo.

Thomasson et al. (2003), na realização de estudo de predição da produtividade de área de algodão, utilizaram aeronave equipada com um pacote de sensores multiespectrais GeoVantage para captar as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo ($450 \pm 5\text{nm}$, $550 \pm 5\text{nm}$, $650 \pm 5\text{nm}$, $850 \pm 10\text{nm}$, respectivamente) com resolução de aproximadamente 0,5 metro. Em seus resultados observaram a vantagem da utilização do NDVI como índice de vegetação na predição da produtividade, além da necessidade da adição de outros dados baseados em coletas a campo. Em trabalho semelhante, Li et al. (2001)

usaram sensores multiespectrais manuais na coleta da reflectância tanto do solo quanto das plantas, que juntamente com medidas de biomassa das plantas e produtividade de fibras coletadas em intervalos de 10 dias permitiu a utilização do NDVI na predição do modelo da produtividade de algodão. Os resultados obtidos por Li et al. (2001) concordaram com as observações de Thomasson et al. (2003), uma vez que a significativa correlação entre a reflectância das plantas, NDVI e produtividade de fibra de algodão permitiu a predição em tempo real da produtividade e do grau de desenvolvimento das plantas de algodão.

Devido à elevada variabilidade espacial das características físicoquímicas dos solos do Delta do Mississippi, a qual dificulta o manejo de fertilizantes nitrogenados, Peterson & Varco (2001) decidiram determinar os efeitos da variação do teor de nitrogênio foliar sobre a reflectância da cultura de algodão. Para isso utilizaram imagens aéreas multiespectrais nas bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo (540, 695 e 840 nm respectivamente) com resolução de 2 m, que resultaram em classes de NDVI que foram correlacionadas com os índices de nitrogênio foliar e altura das plantas para os quatro tratamentos que tiveram doses de nitrogênio variando de 0, 50, 100 e 150 kg.ha⁻¹ aproximadamente. Como resultado o NDVI mostrou alta correlação com a altura das plantas tanto no início do florescimento quanto no pico do florescimento. Os resultados também sugeriram a necessidade de elevado cobertura foliar da cultura a campo para correlacionar o NDVI ao teor de nitrogênio das folhas.

Em trabalho de aplicação localizada de inseticida em área de algodão, Fridgen et al. (2002) utilizaram imagens aéreas multiespectrais com câmera ITD RDACS/Model II para coletar as bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo (540nm, 695nm, 840nm, ± 5 nm) com 2 metros de resolução em intervalos de 7 a 10 dias. As imagens foram utilizadas para permitir o mapeamento de áreas com crescimento vigoroso das plantas de algodão onde a vegetação se encontra mais tenra e com isso se torna um habitat mais propício para insetos. Com as imagens foram criados mapas de vegetação pelo índice de NDVI. As classes geradas foram amostradas a campo para a presença e quantidade de insetos, e serviram como zonas de manejo de inseticida para prescrição de aplicações localizadas realizadas por 15 vezes. Como resultado das aplicações variáveis houve redução de 44% do uso total de inseticida e redução de 33% no custo da aplicação de inseticida na área.

Sudbrink Jr. et al. (2002) utilizaram técnicas de sensoriamento remoto e manejo localizado de inseticida, respectivamente na detecção e controle de insetos (*Lygus lineolaris*) em áreas com algodão no Delta do Mississippi. Insetos foram achados em abundância em porções do campo com vigoroso crescimento vegetativo, geralmente representadas por terem plantas mais altas e/ou maior cobertura foliar. Imagens aéreas foram obtidas com utilização de câmeras multiespectrais Duncan 2100, permitindo a criação de mapas de vegetação pelo índice NDVI utilizando o programa ArcView. Em meados de Junho, aproximadamente um mês após semeadura do algodão, foi observado um maior número de insetos (13,90 em 100 armadilhas) em áreas do campo com elevado crescimento vegetativo (plantas com altura de 59cm) com altos valores de NDVI (-0,050) do que o número de insetos (2,86 em 100 armadilhas) encontrados em zonas de baixo vigor (plantas com altura de 32cm) com baixos valores de NDVI (-0,255), com diferença estatística de 5% de probabilidade pelo teste T. Tal evidência indicou a potencial preferência dos insetos por zonas com plantas de maior vigor vegetativo, sendo que o número de insetos acima do nível econômico de dano era de 73 a 80% nas áreas de maior vigor, e de zero a 16% nas áreas de menor vigor. Foram assim utilizadas as classes de NDVI como zonas de manejo na criação de mapas de aplicação localizada de inseticida que resultaram em redução de 25 a 35% nas aplicações. Em Julho o mesmo fato se repetiu possibilitando economia de 20 a 25% no custo das aplicações de inseticidas. No início de Agosto, os valores de NDVI e números de insetos foram baixos em locais onde as plantas atingiram maturidade fisiológica mais rapidamente, apresentando 5 nós acima da última flor branca, com 350 unidades de temperatura acumulada (DD60s). Nesta época um mapa de aplicação localizada de inseticida foi gerado a partir das classes de NDVI, permitindo economia de aproximadamente 20% de inseticida pela não aplicação em regiões com plantas fisiologicamente maduras. A utilização do componente Bollman do programa Cotman Expert System desde o início da floração permitiu a medição de parâmetros como NAWF e maturidade fisiológica, auxiliando na determinação do momento de interrupção nas aplicações. Na maturidade fisiológica as plantas passam a não estar tão vigorosas a ponto de serem alvos dos insetos, sendo esta a época normalmente utilizada para interrupção nas aplicações de inseticidas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

5.1.1 Local de condução do experimento

O experimento foi conduzido durante os anos de 2001, 2002 e 2003 no Condado Fayette, localizado no oeste do Estado do Tennessee, Estados Unidos da América, em área de produção comercial de algodão de 4,3 hectares denominada Moose Lodge 2 (ML2), com localização representada pelas coordenadas geográficas 35,2552695 graus de Latitude Norte e 89,3914724 graus de Longitude Oeste. Toda a condução da cultura foi realizada pelos proprietários da área com aplicações uniformes de insumos em todo o local.

5.1.2 Dados climatológicos

Os dados referentes à precipitação pluvial total mensal e temperatura média do ar para os meses dos anos de 2001 a 2003 e os dados referentes à média histórica (normal) dos valores de precipitação e temperatura para os anos de 1961 a 1990 foram fornecidos pela estação climatológica de Memphis, Tennessee (Memphis Climatological Data, 2004) e encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Precipitação pluvial total mensal e temperatura média do ar para os meses dos anos de 2001, 2002, 2003 e média histórica (normal) para os anos de 1961 a 1990 (Memphis Climatological Data, 2004).

Mês / Ano	Precipitação pluvial total mensal (mm)				Temperatura média do ar (°C)			
	2001	2002	2003	normal	2001	2002	2003	normal
Janeiro	84,3	102,4	22,1	94,7	3,3	7,6	3,2	4,3
Fevereiro	175,0	42,4	209,0	110,5	8,7	6,9	5,5	6,8
Março	89,9	300,2	74,9	137,4	9,6	10,3	12,4	11,7
Abril	100,1	59,9	89,4	138,7	19,8	19,0	17,8	17,2
Maio	160,8	135,4	289,6	126,5	22,3	20,7	22,1	21,8
Junho	53,8	56,4	122,4	90,7	25,4	26,7	23,9	26,2
Julho	140,5	214,6	83,6	96,3	28,4	28,1	27,2	28,1
Agosto	56,9	133,6	56,4	87,1	27,7	27,7	27,4	27,2
Setembro	85,3	313,4	89,9	89,7	23,1	25,3	22,3	23,4
Outubro	175,3	210,3	76,5	76,5	16,5	17,2	17,9	17,3
Novembro	294,9	86,1	128,3	129,5	14,1	9,4	13,1	11,4
Dezembro	258,6	245,4	78,2	145,8	9,0	6,8	6,6	6,5
Média anual	139,6	158,3	110,0	110,3	17,3	17,1	16,6	16,8
Total	1675,4	1900,2	1320,3	1323,3	-	-	-	-
Média de 1º Maio a Out.	99,5	170,7	128,4	98,0	25,4	25,7	24,6	25,3

5.1.3 Imagens aéreas multiespectrais

A aquisição comercial de imagens pela contratação de empresas especializadas na prestação deste serviço é uma prática muito desenvolvida nos Estados Unidos. As imagens aéreas multiespectrais utilizadas neste trabalho (Figuras 3, 4 e 5) foram obtidas comercialmente pela contratação dos serviços da empresa Global Positioning Solutions Inc., com sede no Estado do Mississippi, EUA.



Figura 3 – Imagem aérea multiespectral obtida em 02 / 08 / 2001.



Figura 4 – Imagem aérea multiespectral obtida em 07 / 08 / 2002.

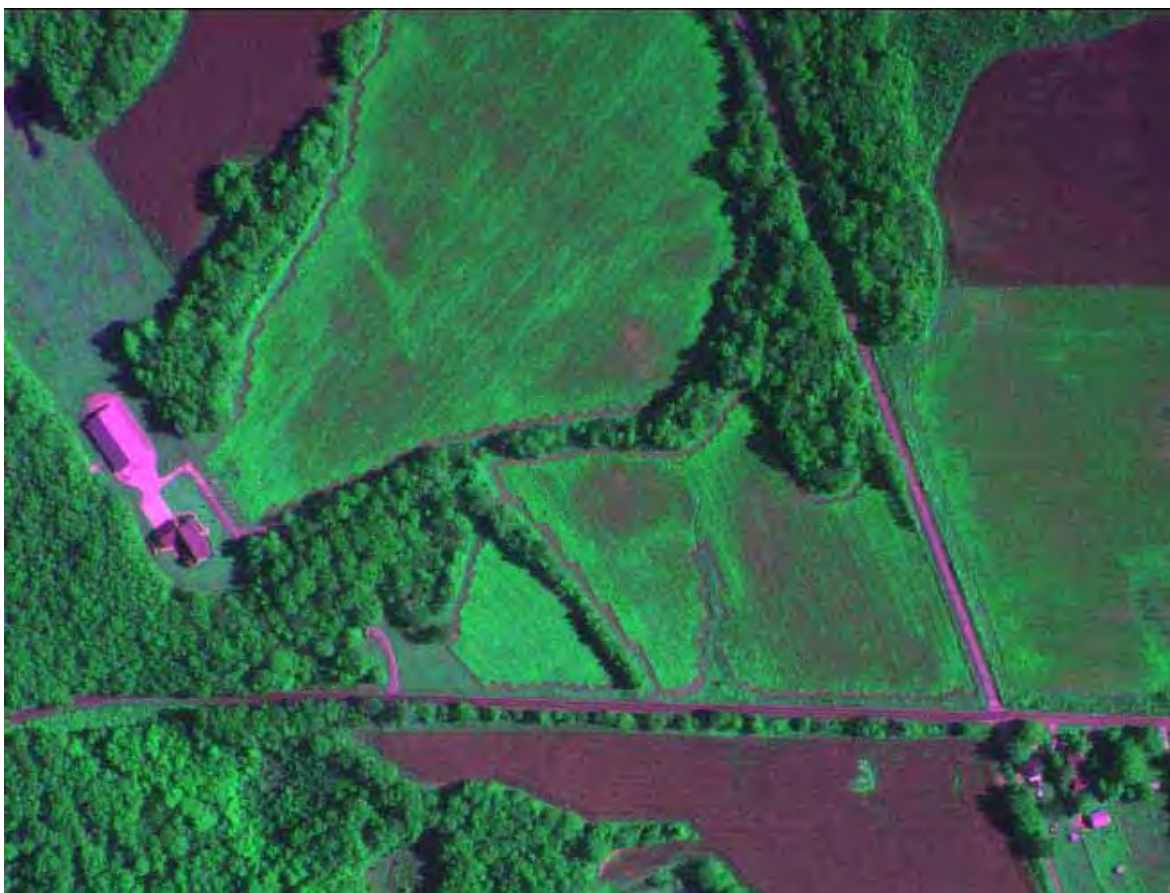


Figura 5 – Imagem aérea multiespectral obtida em 05 / 09 / 2003.

5.1.4 Sistemas de posicionamento global

Para a aquisição das coordenadas dos pontos de controle a campo, usados no georreferenciamento das imagens, foi utilizado um sistema de posicionamento global com correção diferencial e precisão submétrica DGPS marca Starlink 210-A.

Para a navegação até as coordenadas dos pontos no campo onde os dados físicos das plantas de algodão foram amostrados, foi utilizado um DGPS marca Navman conectado a um palmtop Compaq-IPAQ contendo um programa computacional específico para mapeamentos de campo denominado Farm Site Mate. As antenas da guarda costeira americana supriram o sinal de correção diferencial para este sistema DGPS.

5.1.5 Sistema de informação geográfica

O georreferenciamento das imagens foi realizado com uso do programa Erdas Imagine, seguindo sua metodologia própria.

Para a classificação, manipulação, visualização e comparação das imagens e dados foi utilizado o sistema de informação geográfica para uso em agricultura de precisão denominado SSToolbox, instalado em um microcomputador com processador Intel Pentium® 4 de 2,66 GHz, com 512 MB de RAM e 80 GB de memória na unidade de disco.

5.1.6 Programas computacionais

Os programas computacionais utilizados e suas versões foram:

- SAS for Windows – Versão 6.12 (SAS Institute Inc., 1990);
- SSToolbox for Windows – Versão 3.3 (SST Development Group Inc., 2001);
- Erdas Imagine – Versão 8.7 (ERDAS Inc., 1997);
- Farm Site Mate – Versão for Windows CE;
- Microsoft® Excel 2000 – Versão 9.0.3821 SR-1 (Microsoft Corporation, 1985);
- Microsoft® Word 2000 – Versão 9.0.3821 SR-1 (Microsoft Corporation, 1983);
- Cotman for Windows – Versão 3.2.04 (Cotman, 1999).

5.2 Métodos

5.2.1 Seqüência de operações

O cronograma descrito a seguir mostra a seqüência de coleta, classificação e análise dos dados realizados durante toda a condução da cultura do algodão nos anos de 2001, 2002 e 2003:

- Aquisição das imagens aéreas multiespectrais;
- Aquisição das coordenadas dos pontos de controles;
- Georreferenciamento das imagens aéreas multiespectrais;

- Classificação das imagens em zonas de manejo por classes de vegetação;
- Amostragem a campo dos atributos físicos das plantas de algodão;
- Avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão;
- Classificação das imagens em cinco classes de NDVI e suas implicações;
- Verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço;
- Avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos nas zonas de manejo obtidas para os diferentes anos.

5.2.2 Aquisição das imagens aéreas multiespectrais

A empresa contratada para aquisição das imagens utilizou uma câmera digital multiespectral marca Duncantech 2100 CIR com lentes Tokina 17mm F3,5 para obtenção das imagens da área de algodão nas bandas do verde (G), vermelho (R) e infravermelho próximo (NIR), com resolução espectral de 540 a 560 nm, 660 a 680 nm, 830 a 870 nm, respectivamente. A câmera foi montada em uma aeronave Cessna 182, utilizando um DGPS marca Trimble Trimflight 3 para a localização da área de interesse. Os vôos foram realizados a uma altitude entre 1700 e 2600 metros acima do solo e a resolução espacial obtida foi de 2,0 metros para as imagens de 2001 e 2003 e de 1,0 metro para a imagem de 2002.

A aquisição das imagens ocorreu entre os meses de agosto e setembro, com o algodão em estágio de desenvolvimento caracterizado pela fase de abertura das maçãs (Marur & Ruano, 2001), tendo acumulado entre 550^{DD60} e 750^{DD60} após NAWF=5 (cinco nós acima da última flor branca em seu ramo principal). O acúmulo de graus dia de calor foi obtido com utilização do programa Cotman (1999) pela entrada diária dos valores de temperaturas máxima e mínima fornecidas pela estação climatológica de Memphis, Tennessee (Memphis Climatological Data, 2004).

As aquisições das imagens ocorreram nos dias 2 de agosto para 2001, 7 de agosto de 2002 e 5 de setembro de 2003. A imagem do ano de 2003 foi realizada um mês mais tarde que as de 2001 e 2002 em função do acúmulo de graus dia de calor ter sido mais lento em 2003, ano mais frio que os outros, com principal queda de temperatura no mês de junho (Quadro 3).

5.2.3 Aquisição das coordenadas dos pontos de controles

As coordenadas dos pontos de controle para o georreferenciamento das imagens foram demarcadas ao redor do campo em locais de fáceis visualização nas imagens e localização na área, representados principalmente por cantos da área cultivada, cantos ou curvas da estrada que circulava a área, início de ruas de plantio de algodão, placas de sinalização, postes e cruzamentos na estrada de acesso à área.

Com a imagem em mãos caminhou-se até os pontos de interesse e com o equipamento DGPS acoplado ao palmtop foi realizada a aquisição estática das coordenadas de 15 a 20 pontos de controle.

5.2.4 Georreferenciamento das imagens aéreas multiespectrais

As imagens foram georreferenciadas pelas coordenadas dos pontos de controle da área por metodologia própria de georreferenciamento do programa Erdas Imagine (ERDAS Inc, 1997), adotando-se o sistema UTM (Universal Transverse Mercator) na superfície WGS-84 (World Geodetic Survey 1984), Zona 16.

5.2.5 Classificação das imagens em zonas de manejo por classes de vegetação

A classificação das imagens em zonas de manejo foi realizada pelo programa SSToolbox (2001) com uso do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI - normalized difference vegetation index) pelo processo de classificação não supervisionada sobre a imagem. Desta maneira, a área foi dividida em 3 classes de mesmo tamanho representadas pelos valores de NDVI denominados: baixo (L ou low), médio (M ou medium) e alto (H ou high). Para que apenas a área de algodão dentro da imagem fosse classificada, foi criado no SST um arquivo com o perímetro da área pela digitalização de uma linha de contorno sobre suas divisas.

5.2.6 Amostragem a campo dos atributos físicos das plantas de algodão

A amostragem a campo para obtenção dos atributos físicos das plantas de algodão foi realizada para confirmar as diferenças existentes entre as plantas de diferentes classes de NDVI.

As plantas de algodão foram amostradas no final de seu ciclo de desenvolvimento, quando o número de nós acima da última maçã aberta (NACB) estava ao redor de 4 a 6, poucos dias antes da aplicação de desfoliantes.

Para a amostragem foi realizada adaptação da metodologia descrita por Tugwell et al. (1998) utilizada pelo programa Cotman (1999).

As amostras foram coletadas aleatoriamente em 8 pontos para cada uma das 3 classes de NDVI, baixo (L), médio (M) e alto (H), observadas nas imagens. Cada ponto de amostragem teve 10 plantas coletadas.

Com o uso do DGPS acoplado ao palmtop foi realizada a navegação até os pontos de amostragem.

Os atributos físicos das plantas de algodão amostrados foram:

- 1) estande de plantas;
- 2) altura das plantas;
- 3) número total de nós;
- 4) número total de maçãs.

O estande de plantas de cada ponto foi realizado de maneira aleatória pela contagem do número de plantas em 91,4 cm por linha ou fileira de plantio, para 10 linhas consecutivas, para obtenção de uma média do estande (Tugwell et al., 1998), sendo esta medida convertida para número de plantas por metro para cada ponto amostral coletado.

A altura de cada planta amostrada foi medida no caule principal da planta a partir do nó cotiledonar até o nó apical com folha totalmente aberta. Foi calculada a média da altura das 10 plantas coletadas por ponto amostral e o resultado expresso em unidades de centímetros.

O número total de nós de cada planta amostrada foi obtido pela contagem de todos os nós do caule principal da planta a partir do nó cotiledonar, para o qual

foi atribuído o valor zero. Foi calculada a média do número total de nós das 10 plantas coletadas por ponto amostral e o resultado expresso em número de nós por planta.

O número total de maçãs foi obtido pela contagem de todas as maçãs viáveis presentes em cada uma das plantas amostradas. Foi calculada a média do número total de maçãs das 10 plantas coletadas por ponto amostral, e o resultado expresso em número de maçãs por planta.

5.2.7 Avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão

A avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão amostradas foi realizada de maneira a elaborar um delineamento estatístico em parcelas divididas (split plot) representadas pelas 3 classes de NDVI, com 8 repetições representadas pelos pontos amostrados, compostas pela média de 10 plantas cada, ou 10 linhas de plantio no caso do estande de plantas.

A análise dos dados foi realizada com uso do programa SAS (SAS Institute Inc., 1990) tendo como modelo o GLM ou “general linear model procedure”. O teste de significância utilizado foi o Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.2.8 Classificação das imagens em cinco classes de NDVI e suas implicações nas amostragens a campo

Pelo processo de classificação das imagens pelo NDVI do programa SST (2001) foi realizada a divisão da área em 5 classes de mesmo tamanho representadas pelos valores de NDVI denominados: baixo (L), baixo-médio (LM), médio (M), médio-alto (MH) e alto (H). Esta classificação foi realizada para comparar a localização das áreas de transição LM e MH em relação as áreas de L, M e H utilizadas nas amostragens a campo dos atributos físicos das plantas de algodão, e com isso, criar uma metodologia de amostragem levando em consideração as implicações dos resultados obtidos nas amostragens a campo.

5.2.9 Verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço

A comparação entre as classes de NDVI obtidas pelas imagens de 2001, 2002 e 2003 foi realizada para verificar a estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço. Para isso, foi comparada a localização dos pontos pertencentes às zonas de manejo apresentadas pelas classes de NDVI da área de estudo.

Com a utilização do procedimento denominado ‘mega surface’ do programa SSToolbox foi criada uma superfície única de coordenadas geográficas com três camadas de dados representadas pelos valores de NDVI obtidos nos anos de 2001, 2002 e 2003. Foi feita a sobreposição das classes de NDVI obtidas pelas imagens para permitir a identificação visual e a porcentagem de área comum às mesmas zonas de manejo entre os anos do estudo. Para comparar a estabilidade das zonas de manejo foi identificada a localização de áreas pertencentes à mesma classe de NDVI obtidas entre imagens duas a duas e de áreas de transição de uma classe para outra.

5.2.10 Avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada nas zonas de manejo obtidas para os diferentes anos

Para avaliar o resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos nas zonas de manejo obtidas pelas classes de NDVI das imagens de 2001, 2002, e 2003, foi realizada uma demonstração quantitativa das áreas comum e de transição das zonas de manejo entre imagens de anos diferentes.

Com o procedimento ‘mega surface’ do programa SST foi criada uma planilha com a localização de todos os pontos da área e seus valores de NDVI para cada ano do estudo. A planilha de dados foi exportada para o programa Microsoft Excel visando a realização de cálculos para demonstrar a porcentagem de áreas pertencentes à mesma classe e de áreas de transição de uma classe para outra entre os anos. O mesmo processo de questionamento e correlação entre camadas ou planilhas de dados realizado pelo sistema de informação geográfica SST foi feito manualmente utilizando os procedimentos da ‘função lógica’ do programa Excel. Atribuíram-se valores diferentes para pontos presentes à mesma classe de NDVI de um ano para outro e para pontos que sofreram a transição entre as classes,

os quais foram somados para avaliação das porcentagens de acerto e erro de uma suposta aplicação localizada. Assim, a análise foi realizada pela simulação do acerto e erro entre aplicação baseada em um mapa de prescrição (classes de um ano) e seu resultado no mapa de aplicação (classes de outro ano).

Considerou-se como acerto o tratamento das áreas que permaneceram na mesma zona de manejo com o passar do tempo, e também das áreas que, apesar de serem de transição, no ano da aplicação receberam a dose correspondente a zona de manejo em que se encontravam. Por outro lado, foi considerado com erro o tratamento das áreas de transição entre as zonas de manejo com o passar do tempo, com exceção das que no ano da aplicação receberam a dose correspondente à zona de manejo em que se encontravam.

Para realizar o cálculo do efeito da adoção das classes de NDVI de uma imagem como zona de manejo para a aplicação localizada de insumos e seu resultado sobre as áreas de transição entre classes da imagem de outro ano, atribuiu-se que áreas de transição entre classes de baixo e médio NDVI deveriam ser tratadas em zonas de manejo de baixo vigor, de transição entre médio e alto NDVI, em zonas de manejo de médio vigor, e de transição entre alto e baixo NDVI, em zonas de manejo de alto vigor.

O cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI das imagens de anos diferentes foi realizada para as seis combinações existentes entre os anos de 2001, 2002 e 2003, que resultaram em comparação das classes de 2001 x 2002, 2002 x 2001, 2001 x 2003, 2003 x 2001, 2002 x 2003 e 2003 x 2002. Para as comparações não foi levado em consideração a cronologia dos anos usados como exemplos para os cálculos, uma vez que não haveria significado usar as zonas de manejo de um ano posterior para realizar a aplicação em um ano anterior.

A opção de comparar as três imagens duas a duas permitiu a avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos com base nas zonas de manejo obtidas em um ano qualquer como mapa de prescrição para todas as futuras aplicações localizadas da área, não importando a imagem utilizada inicialmente no processo de transição de aplicação uniforme para aplicação localizada. Esta opção permite que comparações entre anos com diferenças climáticas sejam utilizados como critério de avaliação da possibilidade de iniciar o processo de aplicação localizada a qualquer momento, com base em uma imagem multiespectral de apenas um ano.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Dados climatológicos

Os valores de precipitação pluvial total mensal e temperatura média do ar para os meses dos anos de 2001, 2002, 2003 e média histórica (normal) para os anos de 1961 a 1990, encontram-se no Quadro 3. Quando os valores da média anual de precipitação pluvial e temperatura do ar para os anos do estudo são comparados com a média histórica de precipitação pluvial e temperatura do ar é possível observar que o ano de 2001 foi um ano chuvoso e quente (139,6mm e 17,3°C), o ano de 2002, chuvoso e quente (158,3mm e 17,1°C), o ano de 2003, precipitação normal e frio (110,0mm e 16,6°C), considerando como normal os valores da média histórica (110,0mm e 16,8°C). Porém, quando a mesma comparação leva em consideração os valores da média de precipitação pluvial e temperatura do ar para os cinco meses de condução da cultura do algodão, normalmente do início de maio ao final de setembro, os resultados indicam que o ano de 2001 foi um ano com precipitação e temperaturas normais (99,5mm e 25,4°C), que 2002 foi um ano muito chuvoso e mais quente que o normal (170,7mm e 25,7°C), que 2003 foi um ano mais chuvoso e mais frio que o normal (128,4mm e 24,6°C), considerando como normal os valores da média histórica para os cinco meses (98,0mm e 25,3°C). Estes valores são importantes no momento da avaliação das diferenças entre as características de crescimento e vigor das plantas de algodão amostradas a campo.

6.2 Imagens aéreas multiespectrais

As imagens aéreas multiespectrais obtidas para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente.

A coloração da vegetação observada nas imagens é uma mistura entre as cores do espectro visível do verde e vermelho, sendo o verde sua cor predominante, concordando com as observações de Schlemmer et al. (1999), que associaram a reflectância nas bandas do verde e vermelho às clorofilas dos vegetais. Não é possível a visualização da região do infravermelho próximo adquirida como parte da imagem, porém este espectro será importante na classificação das imagens.

Dentro das áreas de algodão é possível observar as linhas de plantio e as diferenças entre a coloração verde das plantas. Na Figura 3, na maior área de algodão localizada na porção norte da imagem, existe manchas de verde mais claro no centro e no oeste da área com plantas de algodão com cobertura foliar suficiente para cobrir o solo, o qual pode ser visto de maneira exposta entre as linhas de plantio de toda a área e em uma mancha na região sudeste da área. Estas diferenças observadas concordam com as aplicações do sensoriamento remoto nas mudanças do vigor da vegetação e avaliação de resíduos culturais descritas por Johannsen et al. (1999). Apesar da interpretação visual ter permitido a diferenciação das características existentes dentro das áreas de algodão, fica difícil mensurar estas diferenças, o que pode ser feito com a interpretação automatizada com auxílio de índices de vegetação.

6.3 Imagens aéreas multiespectrais georreferenciadas

As imagens georreferenciadas com base nos pontos de controle demarcados a campo para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentadas pelas Figuras 6, 8 e 10, respectivamente.

A visualização da área de estudo e suas características ficaram melhor ilustradas nas imagens georreferenciadas quando comparadas com as imagens antes do georreferenciamento, uma vez que a área de interesse foi colocada no centro das figuras e as áreas vizinhas isoladas da imagem.

Foi possível observar um padrão de similaridade entre cor e forma das imagens obtidas para os três anos ao serem comparadas regiões com as mesmas características de vegetação de algodão. Na porção oeste das imagens, em uma estreita faixa que acompanha toda sua divisa de norte a sul, foi possível observar vegetação de verde mais intenso, característica que se repetiu em quase todo o contorno das imagens. Dividindo-se as imagens ao meio de norte a sul, foi possível verificar que em cada porção existe a presença de um mancha de vegetação de coloração aroxeadada, quase tão clara quanto as estradas de solo exposto ao redor de toda a área. Na porção central das imagens existe uma faixa descoberta que vai do centro para o sul da área, onde não foi cultivado o algodão em função da elevada umidade do solo do local, o qual recebeu água proveniente da estrada localizada ao sul das imagens, sendo possível observar a coloração aroxeadada nestes locais de solo descoberto de elevada umidade.

6.4 Imagens classificadas em três zonas de manejo pelas classes de NDVI

As imagens aéreas multiespectrais georreferenciadas foram classificadas pelo índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) no programa SST para que a área fosse dividida em três classes distintas capazes de representar de maneira relativa as diferenças entre a vegetação de algodão a ser amostrada a campo. As classes divididas em intervalos representados pelos valores de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentadas pelas Figuras 7, 9 e 11, respectivamente.

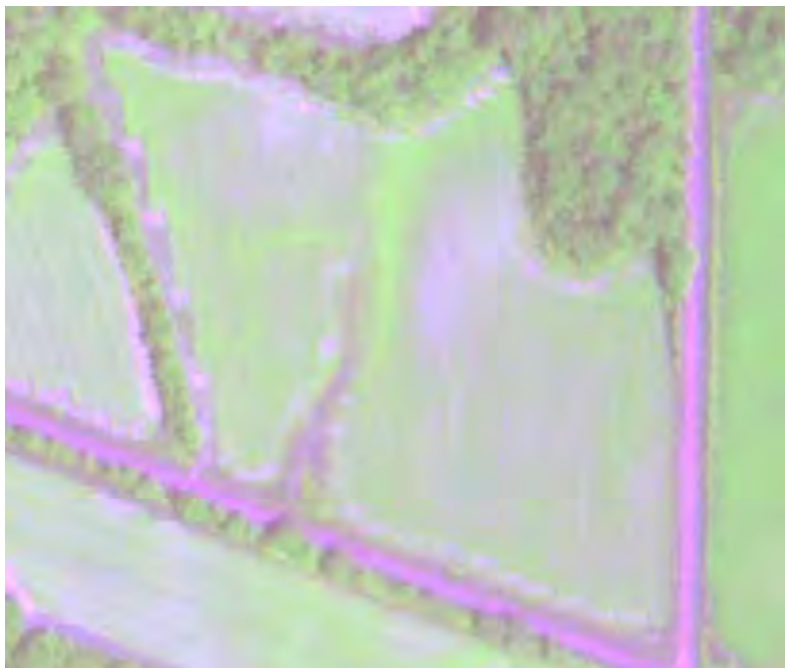


Figura 6 – Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2001.

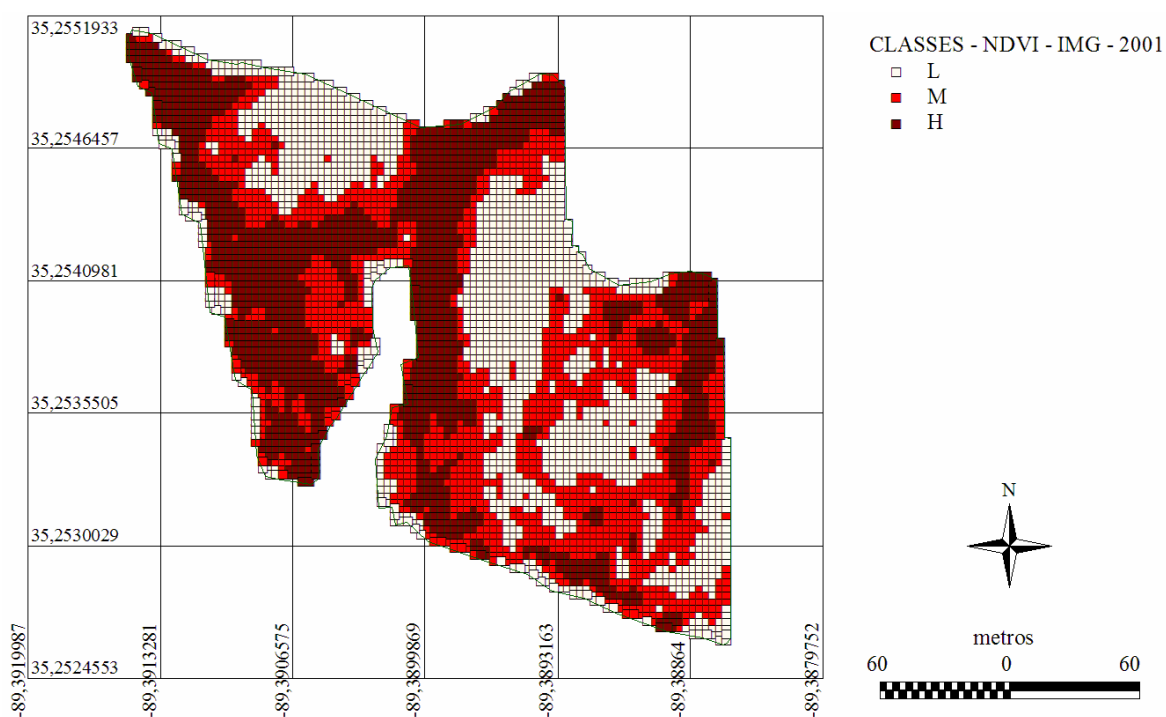


Figura 7 – Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2001.

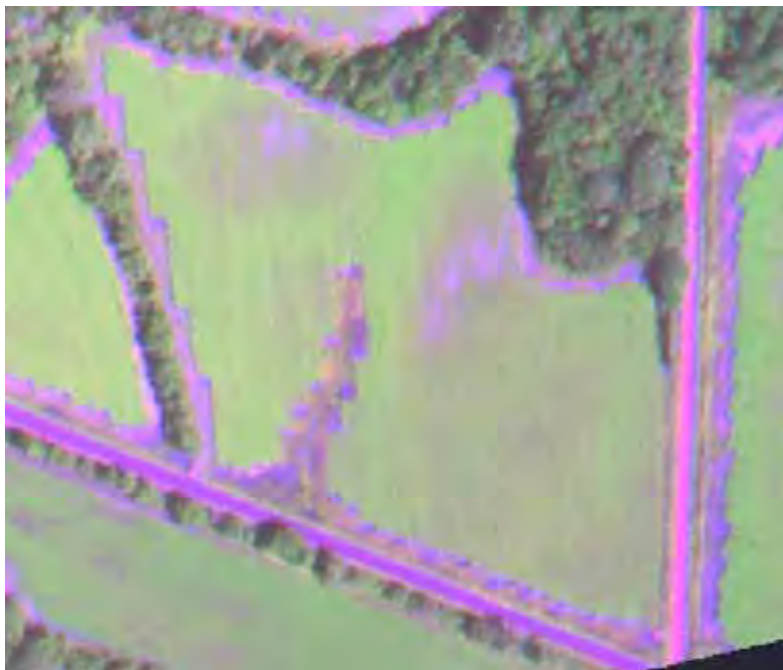


Figura 8 – Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2002.

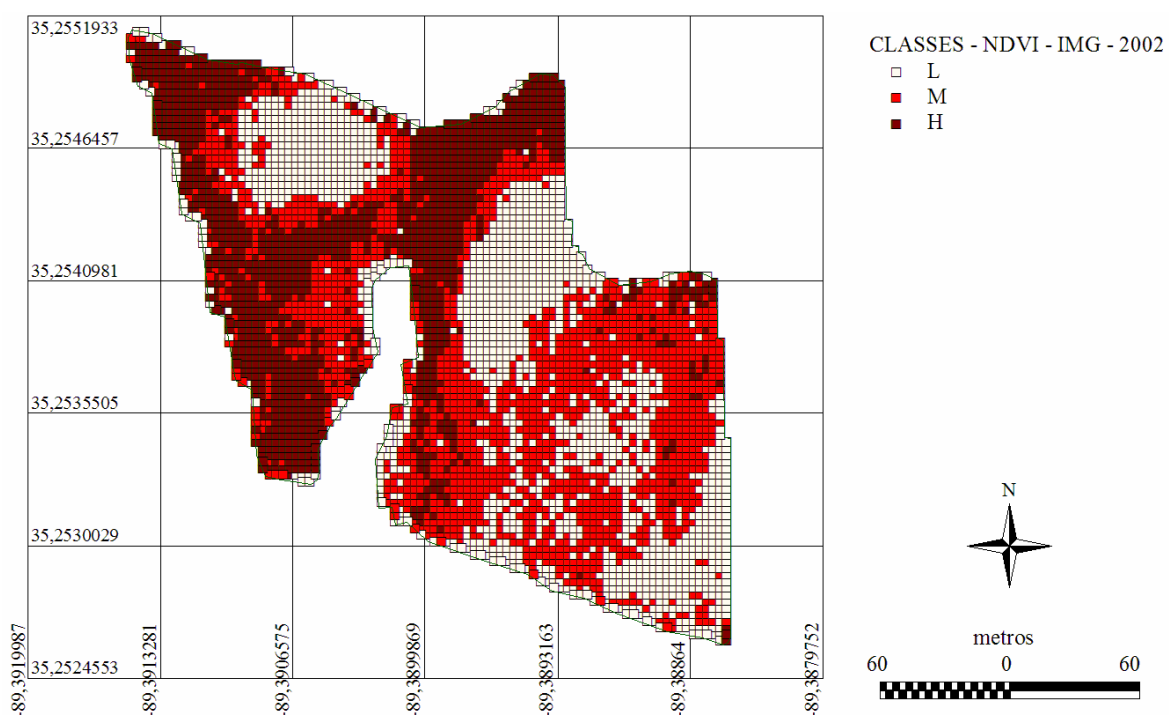


Figura 9 – Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2002.

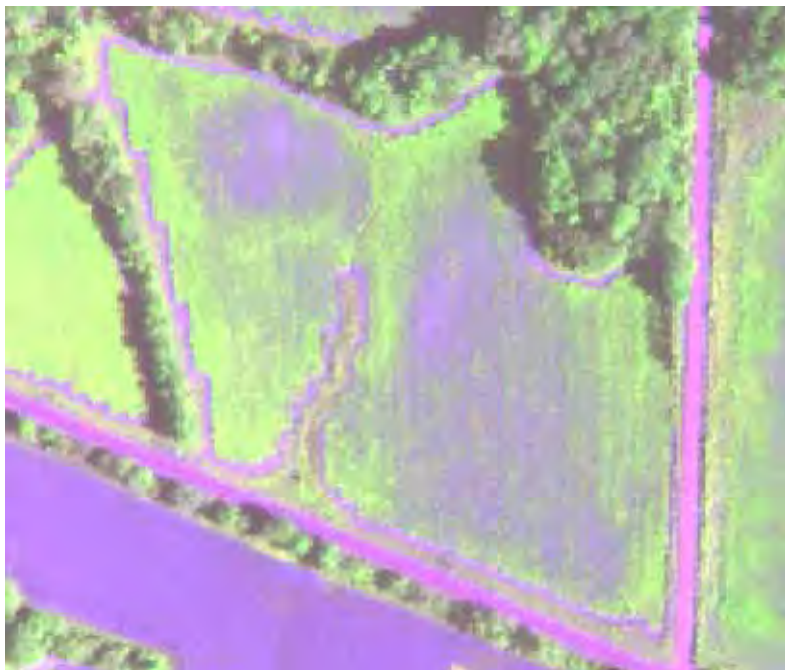


Figura 10 – Imagem aérea multiespectral georreferenciada obtida no ano de 2003.

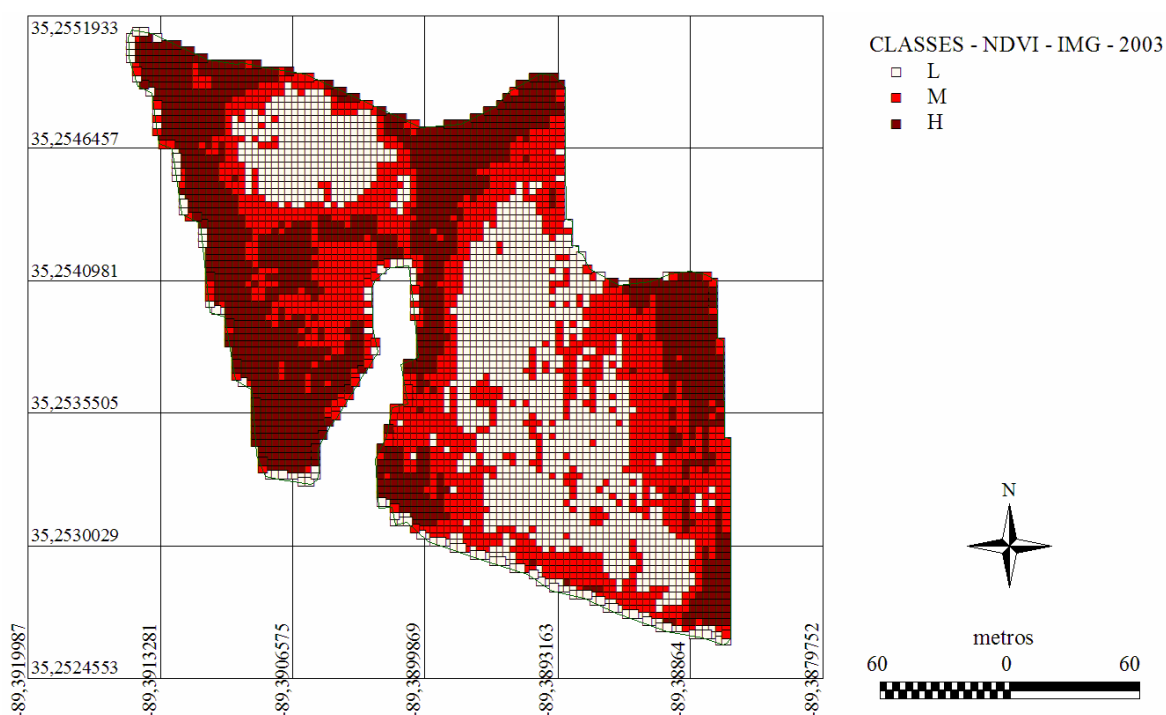


Figura 11 – Classes de NDVI (L-baixo, M-médio, H-alto) obtidas pela classificação da imagem aérea multiespectral georreferenciada do ano de 2003.

Quando se compara as imagens georreferenciadas obtidas nos anos de 2001, 2002 e 2003 (Figuras 6, 8 e 10, respectivamente) com as classes de NDVI obtidas por sua classificação (Figura 7, 9 e 11, respectivamente), observa-se elevada correlação visual entre as classes de NDVI e as diferentes tonalidades da vegetação da imagem, o que segundo Schlemmer et al. (1999), pode ser explicado pela elevada sensibilidade dos índices que comparam porções do espectro do visível nas bandas do vermelho e do verde com o infravermelho próximo às variações na cobertura foliar das culturas e condições de vigor da vegetação.

Entre a divisa cultivada e o carreador a oeste da imagem obtida no ano de 2001 (Figura 6) existem pequenas áreas aroxeadas de solo exposto que foram classificadas como regiões de baixo NDVI (Figura 7). Esta interpretação também ocorre em outras porções das divisas da área, e se repete na classificação das imagens de 2002 (Figura 9) e de 2003 (Figura 11). A interpretação deste detalhe é importante na utilização das classes de NDVI como zonas de manejo para a aplicação localizada de insumos, uma vez que a vegetação existente nas proximidades do perímetro da área pode ser classificada de maneira incorreta.

Na imagem georreferenciada de 2003 (Figura 10) se observa um elevado sombreamento da área por árvores localizadas na região nordeste da imagem. Na Figura 11 é possível observar que o formato da área sombreada foi classificado como região de médio NDVI, o que pode representar outro erro de interpretação.

Comparando as imagens georreferenciadas com as classes de NDVI obtidas após sua classificação fica clara a relação entre as áreas de baixa cobertura foliar e elevada exposição do solo nas imagens e a classe de baixo NDVI. Este resultado também foi observado por Schlemmer et al. (1999), que atribuíram um forte relacionamento entre a reflectância da região do infravermelho próximo e a cobertura foliar da cultura.

O mesmo padrão de similaridade de características de vegetação observado entre as imagens obtidas para os três anos (Figuras 6, 8, 10) pode ser visto pela comparação entre as classes de NDVI obtidas pelas imagens dos três anos (Figuras 7, 9, 11). Tanto as classes de baixo como as de alto NDVI tiveram sua presença nas mesmas regiões com o passar dos anos, sendo cercadas pela classe de médio NDVI. As maiores variações na posição das classes ocorreram na região ao nordeste da área, classificada como alto NDVI nos anos de 2001 e 2003 (Figuras 7 e 11, respectivamente) e como médio NDVI no ano de 2002

(Figura 9), e na região ao sudeste da área, que apresentou variação nas classes de baixo e médio NDVI com o passar dos anos.

A classificação das imagens multiespectrais pelo índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) é uma classificação relativa para cada ano, uma vez que não leva em consideração as características espectrais absolutas da vegetação de algodão encontrada em cada ano, e sim, analisa toda a imagem e distribui os valores de NDVI em intervalos que representam as classes obtidas. No Quadro 4 são apresentados os intervalos de valores de NDVI para as três classes de NDVI obtidas pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003. A classe de baixo NDVI teve valores de 0,00 a 0,22 para 2001, de 0,00 a 0,59 para 2002, e de 0,00 a 0,24 para 2003, enquanto a classe de médio NDVI variou de 0,23 a 0,29 para 2001, de 0,60 a 0,63 para 2002, e 0,25 a 0,43 para 2003, e a classe de alto NDVI variou de 0,30 a 0,45, de 0,64 a 0,70, e de 0,44 a 0,63 para 2001, 2002 e 2003 respectivamente. Os intervalos totais dos valores de NDVI observados foram de zero no limite inferior para todos os anos, tendo variação no limite superior, que correspondeu a 0,45 para 2001, a 0,70 para 2002, e a 0,63 para 2003, o que denotou numa maior variabilidade espectral para os anos de 2002, seguido de 2003 e 2001. A classe com maior intervalo de valores de NDVI foi a de baixo NDVI para o ano de 2002, englobando a vegetação com variação de 0,00 a 0,59 de NDVI.

Quadro 4 – Intervalos de valores de NDVI para as três classes de NDVI obtidas pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003.

Classes de NDVI	Intervalos de valores de NDVI obtidos para os anos de		
	2001	2002	2003
L – baixo	0,00 – 0,22	0,00 – 0,59	0,00 – 0,24
M – médio	0,23 – 0,29	0,60 – 0,63	0,25 – 0,43
H – alto	0,30 – 0,45	0,64 – 0,70	0,44 – 0,63

6.5 Avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão

Os resultados obtidos pela avaliação estatística dos atributos físicos das plantas de algodão são apresentados na forma de Quadros e Figuras, onde as médias seguidas de mesmas letras não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

6.5.1 Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2001

Os resultados do estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão encontram-se no Quadro 5, onde pode ser observado que a classe de alto NDVI apresentou plantas com maior altura, maior número total de nós e maior número total de maçãs em relação à classe de baixo NDVI.

Não houve diferença significativa para o estande de plantas entre as classes de NDVI, confirmando o resultado que havia sido esperado em função do plantio convencional da área, que aplica a mesma quantidade de sementes na área toda com o objetivo de obter estande de plantas uniforme.

Quadro 5 – Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2001.

Classes de NDVI	Estande (plantas/m)	Altura das plantas (cm)	Número total de nós por planta	Número total de maçãs por planta
L – baixo	8,1 A	55,9 C	13,8 B	3,9 B
M – médio	9,1 A	80,9 B	17,7 A	7,1 A
H – alto	9,7 A	91,7 A	17,0 A	7,5 A
Média	9,0	76,2	16,2	6,1
DMS	2,3	3,5	1,4	1,2
CV (%)	22,1	4,0	7,3	17,8
R ²	0,28	0,98	0,79	0,82

A altura das plantas foi diferente em todas as classes, sendo encontradas na classe de alto NDVI plantas mais altas, seguida pelas classes de médio e baixo NDVI. O resultado confirmou a alta correlação do NDVI com a altura das plantas observada por Peterson & Varco (2001). Estes resultados demonstram a possibilidade da adoção do manejo localizado com aplicação de doses variadas de regulador de crescimento de acordo com a altura das plantas encontradas em cada classe de NDVI. O controle de insetos também poderia ser realizado de maneira localizada com doses variadas de inseticidas. Sudbrink Jr. et al. (2002) encontraram diferenças estatísticas significativas entre o número de insetos distribuídos em função da altura das plantas, sendo maior a quantidade de insetos em locais com plantas mais altas, com maior vigor vegetativo, obtendo redução de até 35% do volume de inseticidas com sua aplicação localizada com taxas variadas.

As classes de alto e médio NDVI não apresentaram diferença no número total de nós no caule principal das plantas e no número total de maçãs das plantas, sendo diferentes da classe de baixo NDVI, que apresentou plantas com menor número de nós e de maçãs.

Segundo Albers (1999), a altura e o número de nós no caule principal das plantas de algodão estão diretamente relacionados ao vigor e ao estresse das plantas, sendo possível usar os valores de aproximadamente 4,3 a 5,1 cm por nó como referência ao índice altura/nós na fase inicial de florescimento, sendo pequenas as plantas com índice abaixo da referência, em função de possível estresse hídrico sofrido, e altas as plantas com índice acima da referência, em função de possível excessivo uso de fertilizantes nitrogenados. Pelos resultados apresentados no Quadro 5 para a altura e número de nós das plantas foi possível calcular a relação altura/nós e obter os valores de 4,1, de 4,6, e de 5,4 cm/nó para as classes de baixo, médio e alto NDVI, respectivamente. Verificou-se que as plantas da classe de baixo NDVI são muito baixas enquanto que as plantas da classe de alto NDVI são muito altas. Estes resultados demonstram a possibilidade da adoção do manejo localizado de insumos, como por exemplo a aplicação variada de fertilizantes nitrogenados, com doses maiores nas regiões de baixo NDVI e menores nas de alto NDVI, ou aplicação variada de reguladores de crescimento, com doses menores nas regiões de baixo NDVI e maiores nas de alto NDVI.

6.5.2 Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2002

Os resultados do estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão encontram-se no Quadro 6, onde pode ser observado que a classe de alto NDVI apresentou plantas com maior altura, maior número total de nós e maior número total de maçãs em relação à classe de baixo NDVI.

Quadro 6 – Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2002.

Classes de NDVI	Estande (plantas/m)	Altura das plantas (cm)	Número total de nós por planta	Número total de maçãs por planta
L – baixo	10,1 AB	76,0 C	15,4 B	5,0 B
M – médio	10,9 A	97,4 B	16,4 AB	6,4 A
H – alto	9,5 B	117,2 A	17,3 A	7,0 A
Média	10,2	96,9	16,4	6,1
DMS	1,0	8,4	1,3	0,8
CV (%)	7,6	6,7	6,1	10,4
R ²	0,54	0,92	0,68	0,81

Para o estande de plantas os resultados demonstraram haver diferença entre as classes de médio e alto NDVI, com valores mais altos para o estande da classe de médio NDVI. A classe de baixo NDVI não apresentou diferença significativa do estande de plantas quando comparada com as classes de médio e alto NDVI. Segundo Gwathmey, citado por Reed (2002), o estande de plantas é a expressão da uniformidade de semeadura e do vigor das sementes que resulta na germinação das sementes e emergência das plântulas. Uma vez que o plantio da área foi realizado com a semeadura convencional com distribuição da mesma quantidade de sementes em toda a área, a diferença entre estande de plantas poderia ser explicada pela excessiva precipitação pluvial que ocorreu neste ano (Quadro 3), com interferência no vigor das sementes e redução de sua germinação, porém, os valores de

precipitação pluvial são normais para os meses de maio e junho, meses onde ocorrem a germinação e emergência das plântulas, não sendo provável a ocorrência de danos ao vigor das sementes. As falhas no estande final das plantas distribuídas sobre a área podem ser explicadas mais facilmente pelo elevado volume de precipitação pluvial que ocorreu no mês de setembro, quase quatro vezes superior a média esperada para o período, com efeitos sobre a oxigenação das raízes, principalmente em regiões com solo de maior capacidade de retenção de água.

A altura das plantas apresentou diferença significativa entre todas as classes, sendo encontradas plantas mais altas na classe de alto NDVI, seguida pelas classes de médio e baixo NDVI. Mais uma vez o resultado confirmou a alta correlação entre o NDVI e a altura das plantas (Peterson & Varco, 2001) e a possibilidade de aplicação localizada em taxa variadas de regulador de crescimento, fertilizantes nitrogenados, inseticidas e sementes para o controle do vigor das plantas de algodão (Ojala et al., 2003), com bons resultados econômicos e ambientais, com por exemplo os valores obtidos por Fridgen et al. (2002), na redução de 33% do custo da aplicação de inseticidas e quase 50% da quantidade de inseticidas utilizada.

As classes de alto e baixo NDVI apresentaram diferença significativa no número total de nós no caule principal das plantas, sendo encontrado na classe de alto NDVI o maior número de nós por planta. A classe de médio NDVI não diferiu das de alto e baixo NDVI para o número total de nós por planta. As classes de alto e médio NDVI não apresentaram diferença no número total de maçãs das plantas, sendo diferentes da classe de baixo NDVI, com menor número de maçãs.

Aplicando o índice altura/nós e sua referência proposta por Albers (1999) nos resultados de altura e número total de nós por planta apresentados no Quadro 5, foi possível obter os valores de 4,9, de 5,9, e de 6,8 cm/nó para as classes de baixo, médio e alto NDVI, respectivamente. Verificou-se que as plantas da classe de baixo NDVI seguiram um ótimo padrão de crescimento em relação à referência proposta quando comparadas com a mesma classe no ano de 2001, o que pode ser relacionado à elevada precipitação pluvial ocorrida no ano de 2002 (Quadro 3), tendo como consequência a redução do estresse hídrico expressado pela classe de baixo NDVI no ano de 2001. As classes de médio e alto NDVI apresentaram crescimento superior à referência proposta, demonstrando a possibilidade da adoção de manejo variado de insumos como fertilizantes nitrogenados e reguladores de crescimento para corrigir o excessivo vigor das plantas.

6.5.3 Diferenças entre as plantas das classes de NDVI do ano de 2003

Os resultados do estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão encontram-se no Quadro 7, onde pode ser observado que a classe de alto NDVI apresentou plantas com maior altura, maior número total de nós e maior número total de maçãs em relação à classe de baixo NDVI.

Quadro 7 – Estande de plantas, altura das plantas, número total de nós por planta e número total de maçãs por planta de algodão amostradas em três classes de NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano de 2003.

Classes de NDVI	Estande (plantas/m)	Altura das plantas (cm)	Número total de nós por planta	Número total de maçãs por planta
L – baixo	10,8 A	55,8 B	13,3 B	5,2 B
M – médio	10,7 A	69,1 B	15,2 B	7,6 A
H – alto	10,0 A	101,5 A	19,3 A	8,6 A
Média	10,5	75,4	15,9	7,1
DMS	2,5	17,4	2,0	1,8
CV (%)	17,8	17,6	9,7	18,9
R ²	0,15	0,79	0,82	0,67

Não houve diferença significativa entre o estande de plantas entre as classes de NDVI, confirmando o resultado esperado em função do plantio convencional com distribuição uniforme na quantidade de sementes de toda a área.

As classes de baixo e médio NDVI não apresentaram diferença significativa na altura das plantas, sendo diferentes da classe de alto NDVI que apresentou plantas mais altas.

O maior número total de nós por planta foi observado na classe de alto NDVI, seguido das classes de médio e baixo NDVI que não apresentaram diferença significativa entre si.

As classes de alto e médio NDVI não apresentaram diferença no número total de maçãs por planta, sendo diferentes da classe de baixo NDVI com menor número de maçãs.

Aplicando a referência do índice altura/nós proposta por Albers (1999) nos resultados apresentados no Quadro 7, foi possível obter valores aproximados de 4,2, de 4,6, e de 5,3 cm/nó para as classes de baixo, médio e alto NDVI, respectivamente. Observou-se que as plantas da classe de baixo NDVI seguiram um padrão de baixo desenvolvimento vegetativo, apresentando baixa estatura, enquanto que as plantas da classe de alto NDVI tiveram um desenvolvimento muito vigoroso, apresentando elevada altura para sua idade. Estes resultados comprovaram as diferenças entre as classes de NDVI e demonstraram a possibilidade de sua adoção como zonas de manejo com aplicações localizadas de insumos para uniformizar o vigor de crescimento das plantas.

6.5.4 Comparação entre o estande de plantas para os três anos

Os resultados do estande de plantas para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentados nas Figuras 12a, 12b, e 12c, respectivamente, podendo ser observada para todos os anos, a não existência de diferença significativa entre as classes de baixo e alto NDVI.

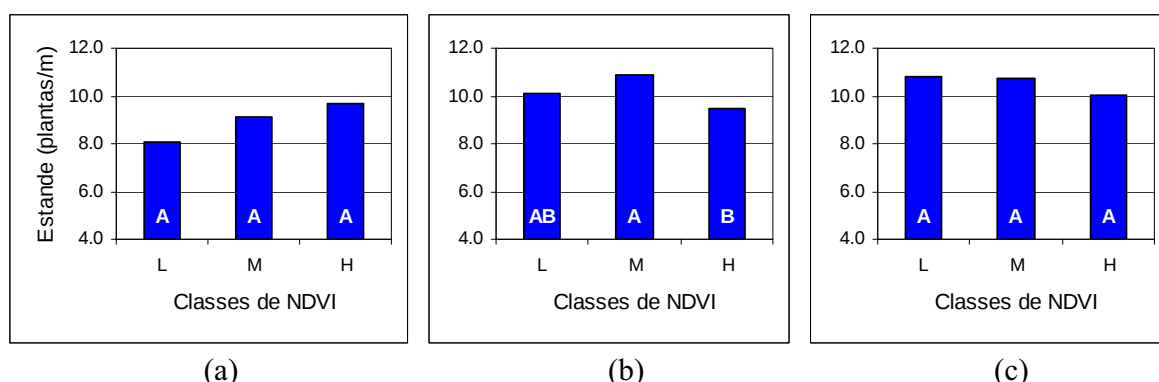


Figura 12 – Estande de plantas de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.

Não houve diferença significativa no estande de plantas entre as classes de NDVI, dos anos de 2001 e 2003, confirmando o resultado que havia sido esperado pelo plantio convencional da área realizado pelo produtor, com aplicação de uma mesma quantidade de sementes em toda a área. Para o ano de 2002 foi observada a diferença do estande entre as classes de médio e alto NDVI, sendo mais alto o valor do estande da classe de médio NDVI, o que pode ser explicado pela morte de plantas no final do ciclo da cultura pelo excesso de precipitação pluvial ocorrida no mês de setembro deste ano (Quadro 3).

Os valores de estande mais baixos são observados para o ano de 2001, seguidos de 2002 e de 2003, o que pode ter sido resultado de uma semeadura com uma taxa de sementes mais baixa para o ano de 2001.

6.5.5 Comparação entre a altura das plantas para os três anos

Os resultados da altura das plantas para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentados nas Figuras 13a, 13b, e 13c, respectivamente, onde pode ser observado para todos os anos que a classe de alto NDVI apresentou plantas com maior altura em relação à classe de baixo NDVI.

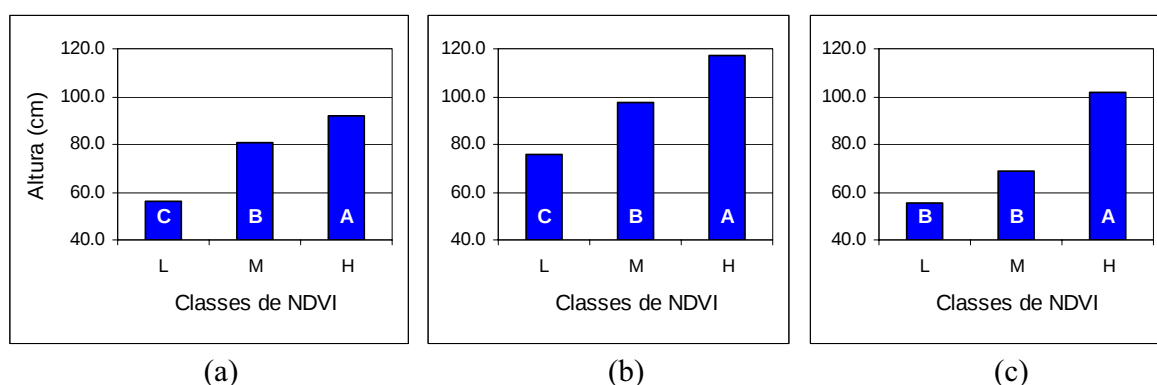


Figura 13 – Altura das plantas de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.

A altura das plantas foi significativamente diferente entre todas as classes dos anos de 2001 e 2002, sendo encontradas na classe de alto NDVI plantas mais altas, seguida pelas classes de médio e de baixo NDVI, o que possibilita a aplicação localizada em taxa variadas de insumos para o controle do vigor das plantas de algodão.

Os valores mais elevados para a altura das plantas foram observados no ano de 2002, decorrente das características de temperatura do ar e precipitação pluvial mais elevadas durante a safra do algodão (Quadro 3), que por ser um ano quente e úmido, favoreceu o elevado desenvolvimento vegetativo das plantas. Os valores mais baixos de altura das plantas foram observados no ano de 2003, ano com temperaturas do ar mais frias que a média normal dos anos (Quadro 3), principalmente nos meses de desenvolvimento vegetativo das plantas, junho e julho.

6.5.6 Comparação entre o número total de nós por planta para os três anos

Os resultados do número total de nós no caule principal das plantas de algodão para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentados nas Figuras 14a, 14b, e 14c, respectivamente, onde pode ser observado para todos os anos que a classe de alto NDVI apresentou plantas com maior número total de nós por planta em relação à classe de baixo NDVI.

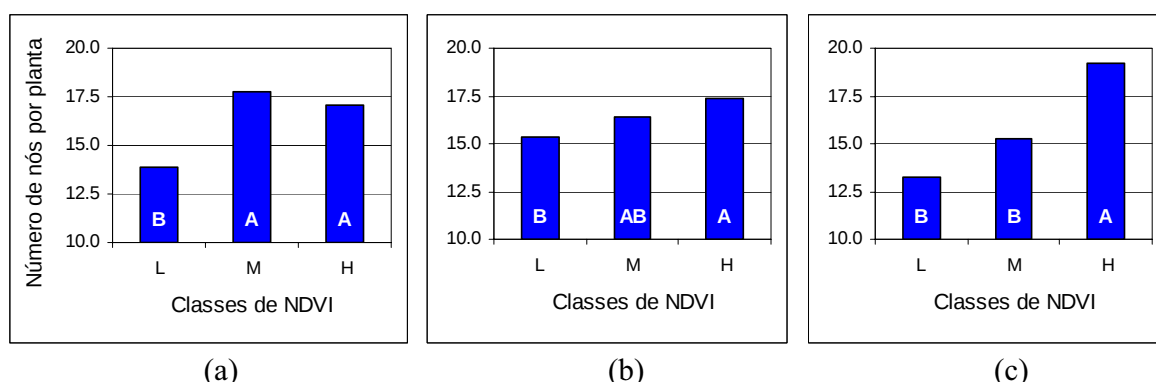


Figura 14 – Número total de nós por planta de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.

O número total de nós no caule principal das plantas da classe de médio NDVI apresentou oscilação de seus valores entre os anos, não se diferenciando da classe de alto NDVI em 2001, não se diferenciando das classes de alto e baixo NDVI em 2002, e não se diferenciando da classe de baixo NDVI no ano de 2003. O valor mais alto no número total de nós por planta foi observado na classe de alto NDVI do ano de 2003, e o mais baixo, na de baixo NDVI do mesmo ano. A existência de tais variações permite a possibilidade de aplicação localizada em taxa variadas de insumos para o controle do vigor das plantas de algodão.

6.5.7 Comparação entre o número total de maçãs por planta para os três anos

Os resultados do número total de maçãs por planta para os anos de 2001, 2002 e 2003 são apresentados nas Figuras 15a, 15b, e 15c, respectivamente, onde pode ser observado para todos os anos que as classes de alto e médio NDVI apresentaram plantas com maior número total de maçãs por planta em relação à classe de baixo NDVI.

As classes de alto e médio NDVI não se diferiram em nenhum dos três anos no número total de maçãs por planta, independentemente das variações no estande, altura, número de nós que ocorreram entre elas e das diferenças das características climáticas observadas nos vários anos, o que pode sugerir que as plantas de ambas as classes tiveram condições de suprir uma maior carga de maçãs em relação à classe de baixo NDVI, que pode ser manejada com doses variadas de insumos para elevação do vigor e retenção de maçãs.

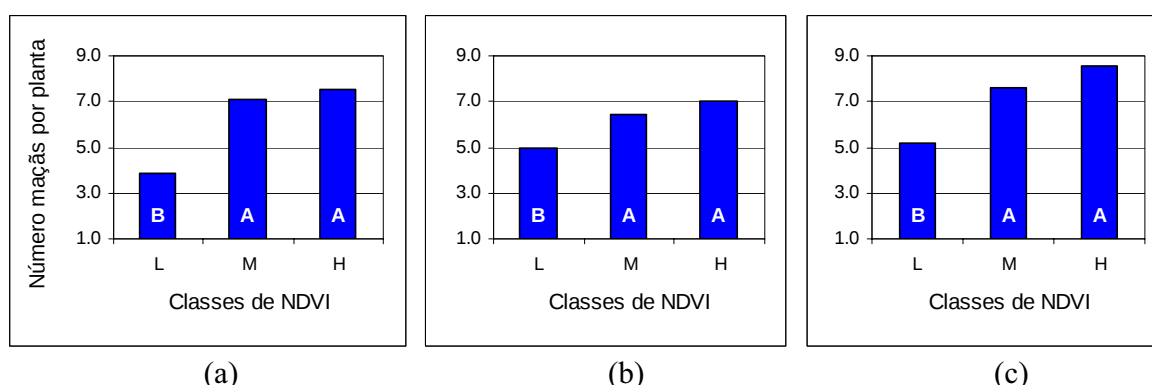


Figura 15 – Número total de maçãs por planta de algodão amostradas em 2001 (a), 2002 (b) e 2003 (c) para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela classificação da imagem multiespectral do ano da amostragem.

6.6 Imagens classificadas em cinco classes de NDVI e suas implicações nas amostragens a campo

A classificação das imagens foi realizada para a divisão da área em classes de baixo (L), baixo-médio (LM), médio (M), médio-alto (MH) e alto (H) NDVI, para os anos de 2001, 2002 e 2003, para comparar a localização das áreas de transição LM e MH em relação as áreas de L, M e H utilizadas nas amostragens a campo. Pela comparação dos intervalos de valores de NDVI obtidos pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003 em três e em cinco classes de NDVI, apresentados no Quadro 8, foi possível observar que não existiu um padrão na transição dos intervalos de valores de NDVI das três classes de L, M e H. Os valores de transição LM nas 5 classes incorporam parte dos intervalos de valores de NDVI das classes L e M nas 3 classes para todos os anos, e os valores de transição MH nas 5 classes incorporam parte dos intervalos de valores de NDVI das classes M e H nas 3 classes para todos os anos, com exceção do ano de 2001, onde a os valores de transição MH (0,30 a 0,33) incorporam apenas parte do intervalo de valores de NDVI da classe H (0,30 a 0,45) e nenhuma parte do intervalo de NDVI da classe M (0,23 a 0,29).

Quadro 8 – Intervalos de valores de NDVI obtidos pela classificação das imagens multiespectrais dos anos de 2001, 2002 e 2003 em três e em cinco classes de NDVI.

Classes de NDVI	Intervalos de valores de NDVI obtidos para os anos de					
	2001		2002		2003	
	3 classes	5 classes	3 classes	5 classes	3 classes	5 classes
L – baixo	0,00-0,22	0,00-0,20	0,00-0,59	0,00-0,57	0,00-0,24	0,00-0,18
LM – baixo-médio		0,21-0,24		0,58-0,60		0,19-0,29
M – médio	0,23-0,29	0,25-0,29	0,60-0,63	0,61-0,62	0,25-0,43	0,30-0,41
MH – médio-alto		0,30-0,33		0,63-0,65		0,42-0,49
H – alto	0,30-0,45	0,34-0,45	0,64-0,70	0,66-0,70	0,44-0,63	0,50-0,63

A interpretação da variação da localização das classes de transição de NDVI e suas implicações nas amostragem a campo foram facilitadas pela representação

gráfica das principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI das imagens dos anos de 2001, 2002 e 2003, respectivamente apresentadas nas Figuras 16, 18 e 20, e das mesmas áreas de amostragem das classes L, M e H e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI das imagens dos anos de 2001, 2002 e 2003, respectivamente apresentadas nas Figuras 17, 19 e 21.

Pela análise dos resultados separadamente por ano, foi possível observar para 2001, Figuras 16 e 17, que as principais áreas de amostragem realizadas na classe de baixo NDVI (Figura 16) também se encontram na classe de baixo NDVI das 5 classes apresentadas na Figura 17, não havendo portanto amostragem em áreas de transição. O mesmo também pode ser observado para as principais áreas de amostragem da classe de alto NDVI. Porém, no caso da classe de médio NDVI, foi possível observar que as principais áreas de amostragem realizadas dentro da classe de médio NDVI (Figura 16), apesar de se encontrarem na classe de médio NDVI das 5 classes apresentadas na Figura 17, estavam muito próximas de classes de transição de médio-alto (MH) NDVI. Este fato pode explicar grande parte da ausência de diferenças estatística significativas entre as classes de médio e alto NDVI para o número total de nós e maçãs por planta (Quadro 5). Para uma amostragem mais segura poder-se-ia classificar as imagens em cinco classes para a amostragem nas classes de L, M e H, deixando as classes de transição LM e MH como uma faixa de segurança entre as classes amostradas.

No ano de 2002 houve grande dispersão da classe de médio NDVI usada na amostragem a campo, como pode ser observado na Figura 18, com as principais áreas de amostragem dentro da classe de médio NDVI das 5 classes apresentadas na Figura 19, e muito próximas de classes de transição de baixo-médio (LM) NDVI, o que pode ter resultado na ausência de diferenças estatística entre as classes de médio e baixo NDVI para as médias de estande e número total de nós por planta (Quadro 6).

Em 2003, as áreas com baixo NDVI sofreram expansão sobre as áreas de médio NDVI (Figura 20) e as principais áreas de amostragem da classe de médio NDVI das 5 classes apresentadas na Figura 21, se localizaram dentro de áreas representadas pela classe de transição de baixo-médio (LM) NDVI, podendo explicar os resultados de ausência de diferenças significativas entre as classes de médio e baixo NDVI para os valores de altura de plantas e número total de nós por planta observados no Quadro 7.

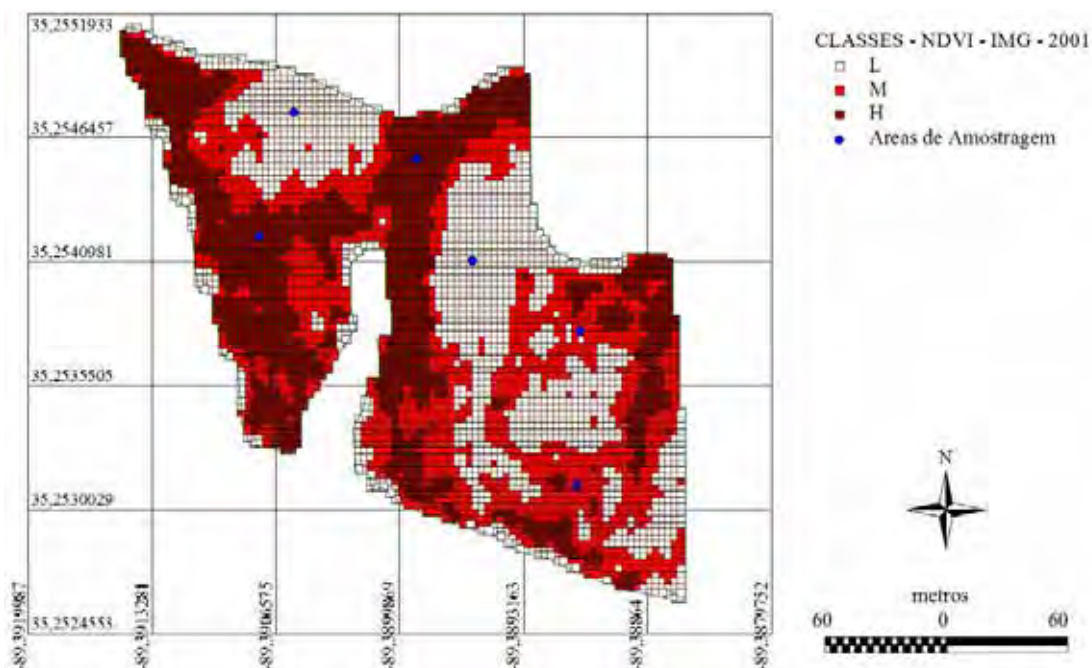


Figura 16 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2001.

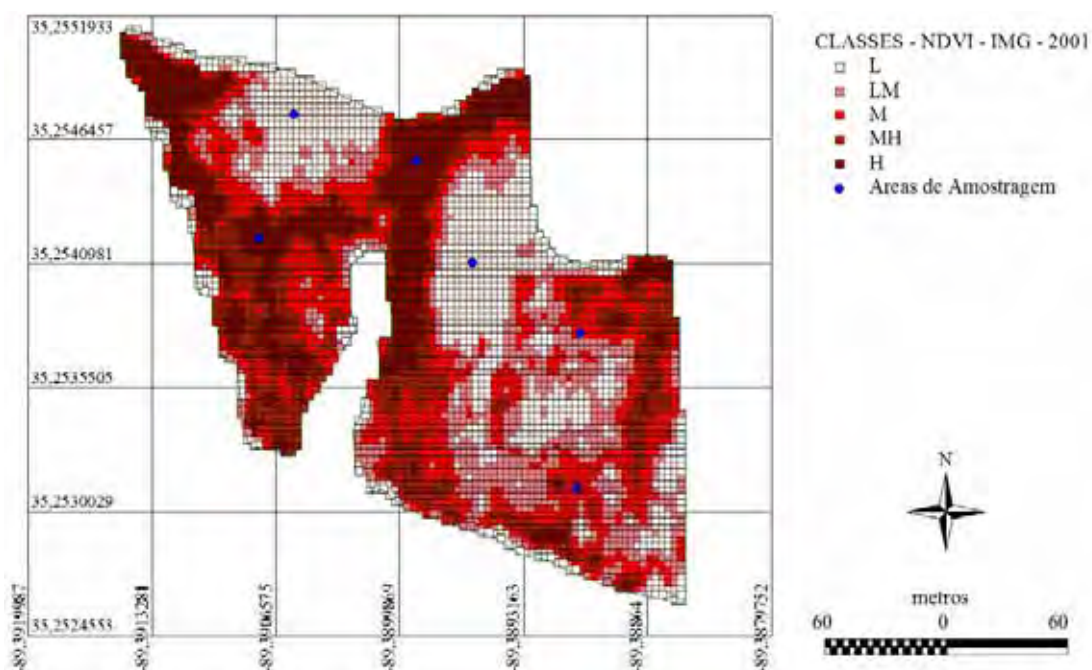


Figura 17 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2001.

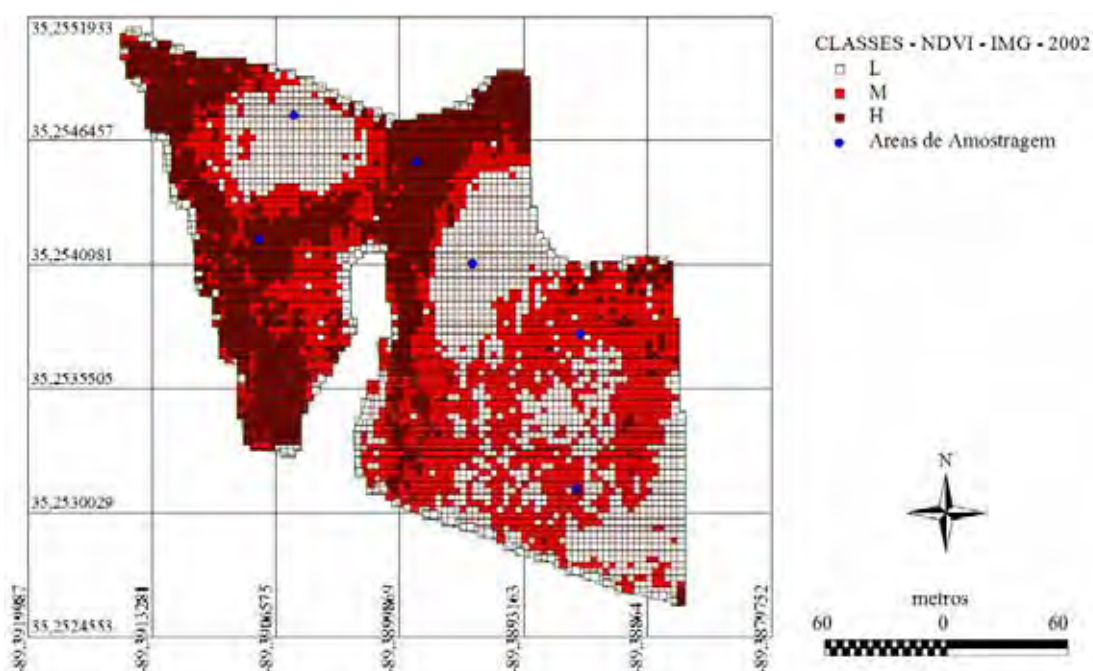


Figura 18 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2002.

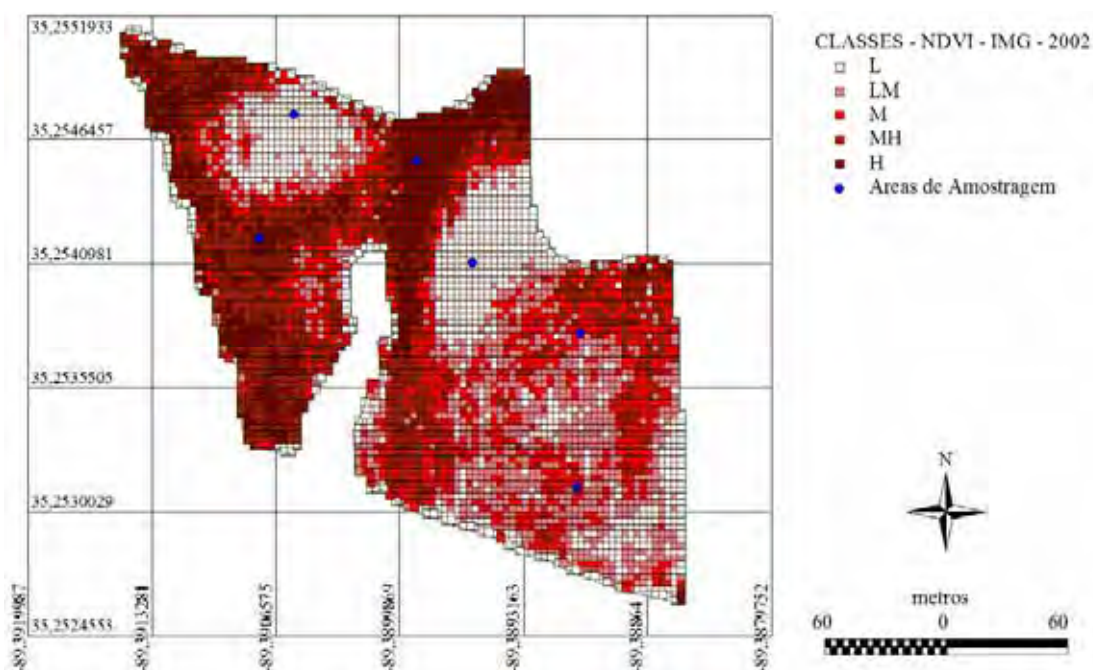


Figura 19 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2002.

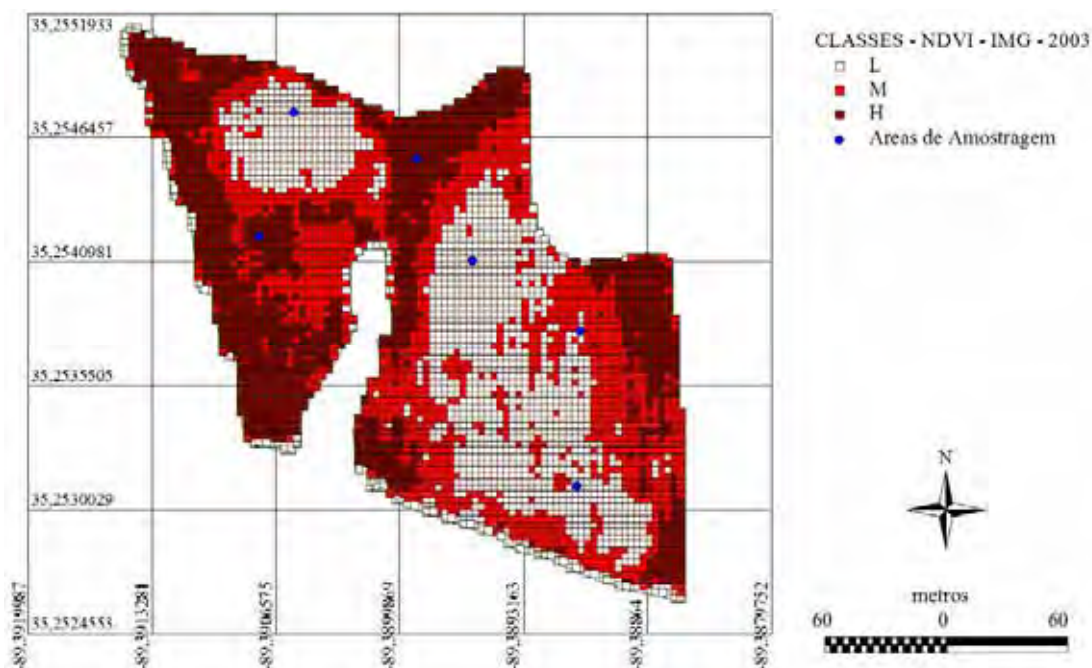


Figura 20 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2003.



Figura 21 – Principais áreas de amostragem das classes de baixo (L), médio (M), e alto (H) NDVI e suas classes de transição de baixo-médio (LM) e médio-alto (MH) NDVI da imagem do ano de 2003.

6.7 Verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço

A comparação entre as classes de NDVI obtidas pelas imagens de 2001, 2002 e 2003 permitiu a verificação da estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço pela localização de áreas pertencentes à mesma classe de NDVI obtidas entre duas imagens e de áreas de transição de uma classe para outra. Os resultados são apresentados nas Figuras 22 a 36, pela comparação entre as classes de NDVI das imagens de 2001, 2002 e 2003, duas a duas, para ilustração das áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI, e no Quadro 9, pela porcentagem das áreas de estabilidade e de transição entre as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas entre imagens comparadas duas a duas entre os anos de 2001 x 2002, 2001 x 2003, e 2002 x 2003.

Quadro 9 – Porcentagem das áreas de estabilidade e de transição entre as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas entre imagens comparadas duas a duas entre os anos de 2001x 2002, 2001 x 2003, e 2002 x 2003.

Classes de NDVI	Porcentagem das áreas correspondente a sobreposição das classes de		
	2001x2002	2001x2003	2002x2003
LxL – baixo-baixo	25	21	23
MxM – médio-médio	19	15	18
HxH – alto-alto	22	22	21
LxM – baixo-médio	17	19	19
MxH – médio-alto	14	17	15
HxL – alto-baixo	3	6	4
Soma da Estabilidade (LxL + MxM + HxH)	66	58	62
Soma da Transição (LxM + MxH + HxL)	34	42	38

6.7.1 Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2001 e 2002

Os resultados ilustrados na Figura 22 permitiram a visualização da localização das áreas de estabilidade entre as classes de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI, que não sofreram alteração entre os anos de 2001 e 2002, e das áreas de transição entre as classes de baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI, que sofreram alteração, sendo uma classe em um ano e outra classe em outro ano.

As áreas de LxL (Figura 23) e de HxH (Figura 25) apresentaram um comportamento muito estável, com localização formando grandes manchas agregadas e bem definidas, correspondendo a 25 e 22% de toda a área, respectivamente. Já as áreas de MxM (Figura 24) estavam mais dispersas na área e não apresentaram um padrão de continuidade necessário para a caracterização de manchas, correspondendo a apenas 19% da área.

A soma de todas as áreas de estabilidade resultou no valor de 66% do total da área (Quadro 9), o que significa uma elevada estabilidade nas zonas de manejo tanto no espaço quanto no tempo decorrido entre os anos de 2001 e 2002.

Na Figura 26 foi possível observar uma grande quantidade de pontos pulverizados sobre toda a área, com algumas manchas de tamanho pequeno e médio, representados pela soma de todas as áreas de transição LxM, MxH e HxL, que correspondeu a 34% da área.

Analisando em conjunto os resultados da localização das áreas de LxL (Figura 23), das áreas de transição (Figura 26) e da porcentagem das áreas de sobreposição entre HxL (Quadro 9), foi possível observar que as áreas sobre o perímetro a leste das figuras representaram áreas que foram cultivadas em um ano e deixaram de ser cultivadas no outro, e por isso se encontraram entre a transição H para um ano e L para outro. As áreas de transição HxL tiveram valor correspondente a 3% da área, podendo ser consideradas como ‘outliers’ ou erros que podem ser eliminados manual ou automaticamente por um processo de filtragem de pontos problemáticos. O mesmo ocorreu em outros locais da área com plantas características da classe de alto NDVI que não completaram seu ciclo devido a fatores externos como inundação ou baixa drenagem de porções da área, incidência de raios, ventos fortes, pisoteio por máquinas e implementos durante o manejo. Estas áreas têm o potencial produtivo da classe de alto NDVI se eliminados os fatores proibitivos e ineficiências de seu manejo.

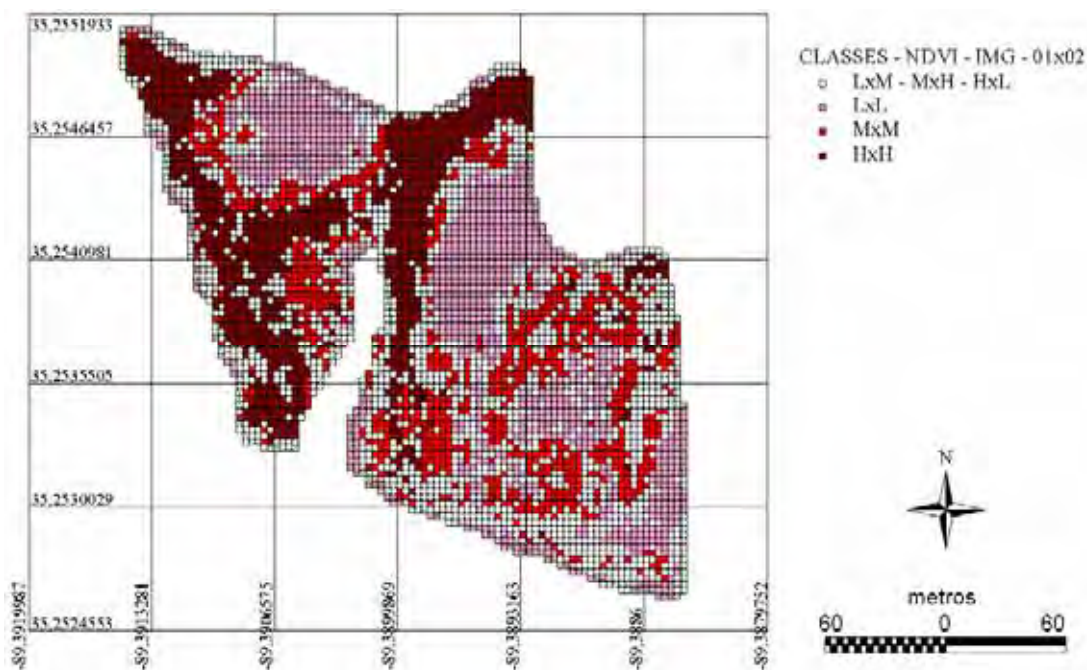


Figura 22 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

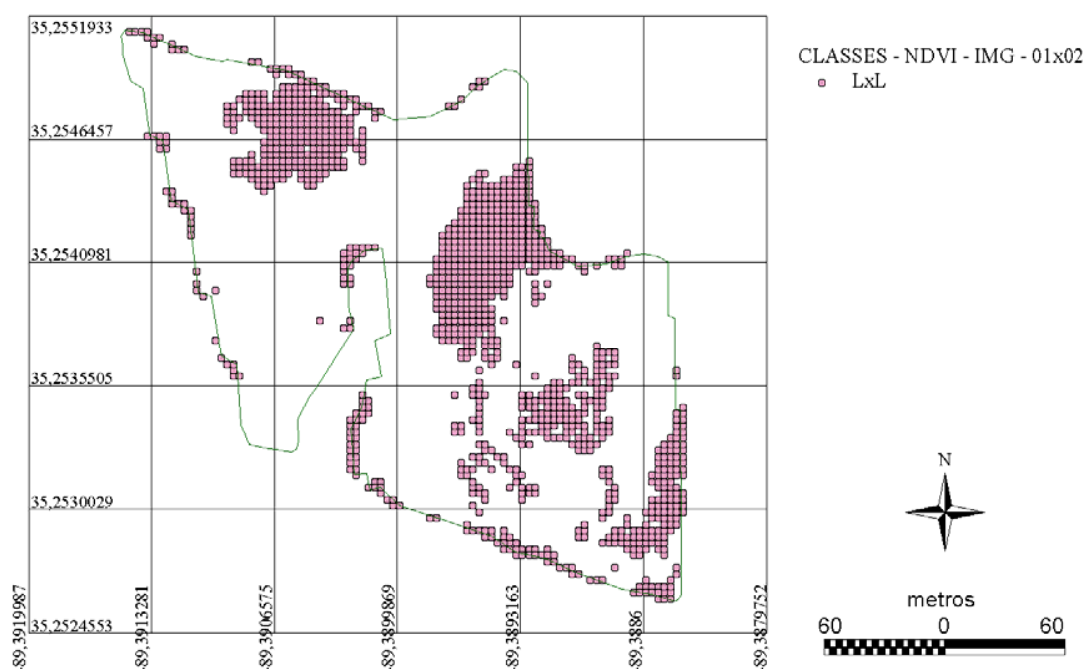


Figura 23 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.

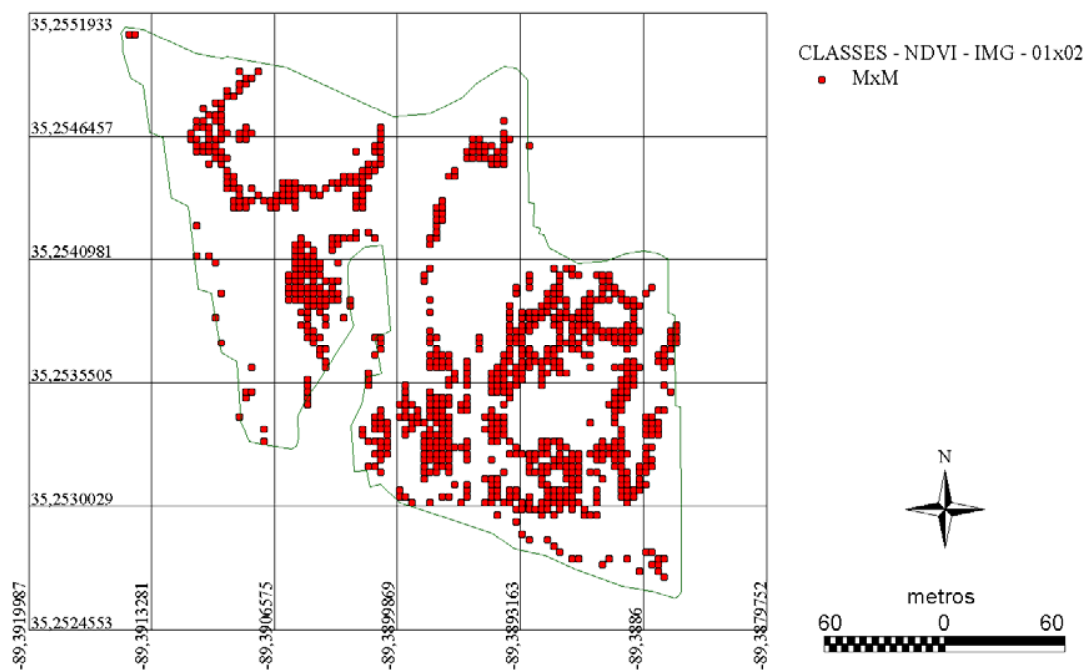


Figura 24 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.

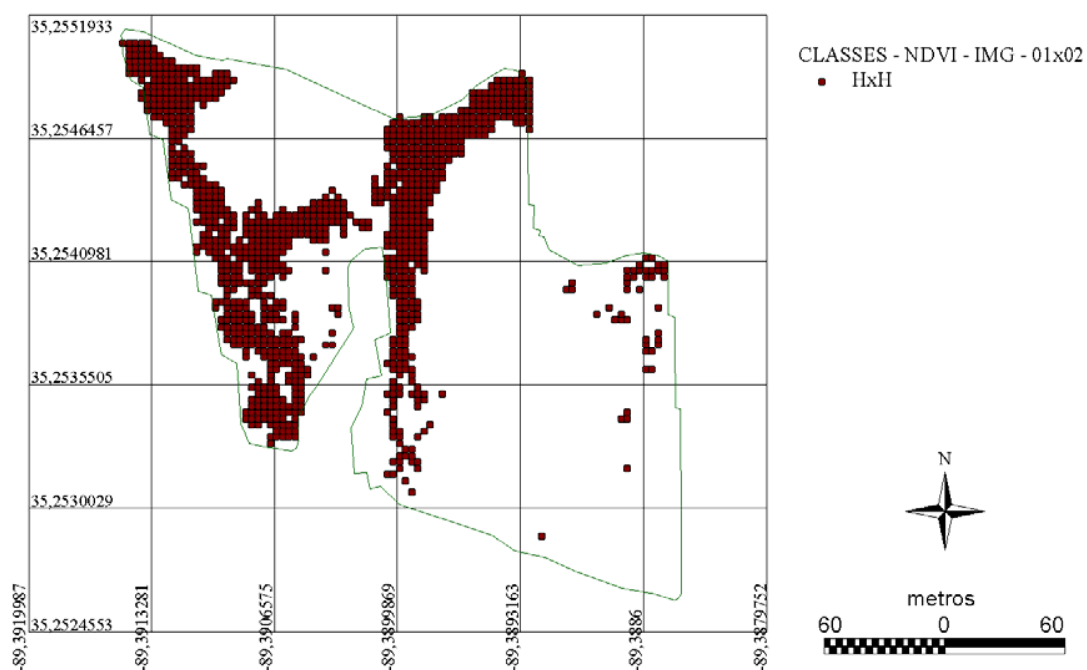


Figura 25 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.

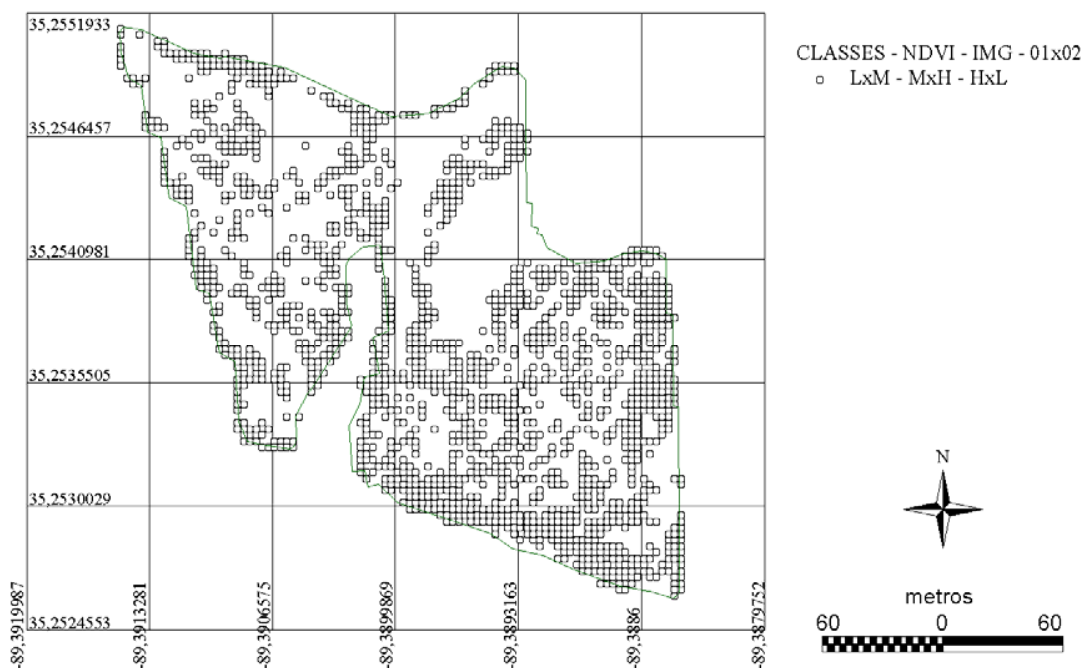


Figura 26 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2002 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

6.7.2 Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2001 e 2003

Os resultados ilustrados na Figura 27 permitiram a visualização da localização das áreas de estabilidade entre as classes de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e das áreas de transição entre as classes de baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI obtidas entre os anos de 2001 e 2003, sendo possível observar padrões bem definidos com agrupamentos de classes em várias porções da área, independente da grande diferença nas condições climáticas entre os dois anos, com padrão de temperatura do ar e precipitações pluviométricas normais para 2001 e temperaturas mais quente e maiores quantidades de precipitações para 2003 (Quadro 3).

As áreas de estabilidade entre as classes de baixo (LxL) NDVI dos anos de 2001 e 2003 (Figura 28) apresentaram o mesmo comportamento estável com formação de grandes manchas agregadas observado na comparação entre 2001 e 2002 (Figura 23), porém houve a redução de seu tamanho de 25 para 21% da área.

As áreas de MxM (Figura 29) apresentaram uma pequena quantidade de pontos, cobrindo apenas 15% da área, de maneira dispersa ou descontínua. A porcentagem da área com a áreas de estabilidade entre as classes de alto (HxH) NDVI entre 2001 e 2003 foi de 22%, mesmo valor observado pela sobreposição das classes entre 2001 e 2002, sendo observada na Figura 30 a estabilidade na localização das áreas comuns as classes de HxH.

A soma de todas as áreas de estabilidade resultou em um valor de 58% de toda a área (Quadro 9), demonstrando uma estabilidade significativa nas zonas de manejo entre anos com elevada diferença de condições climáticas.

Na Figura 31 foi possível observar que as áreas de transição LxM, MxH e HxL, além de pequenas áreas descontínuas espalhadas pela área, tiveram várias manchas de tamanhos médios e pequenos localizadas, principalmente, nas porções centro-sul e sudeste da área, com soma total correspondente a 42% da área. A grande quantidade de pontos próximos do perímetro da área deve ser analisada com cuidado para evitar erros de manejo, uma vez que houve uma sobreposição entre HxL em 6% de toda a área.

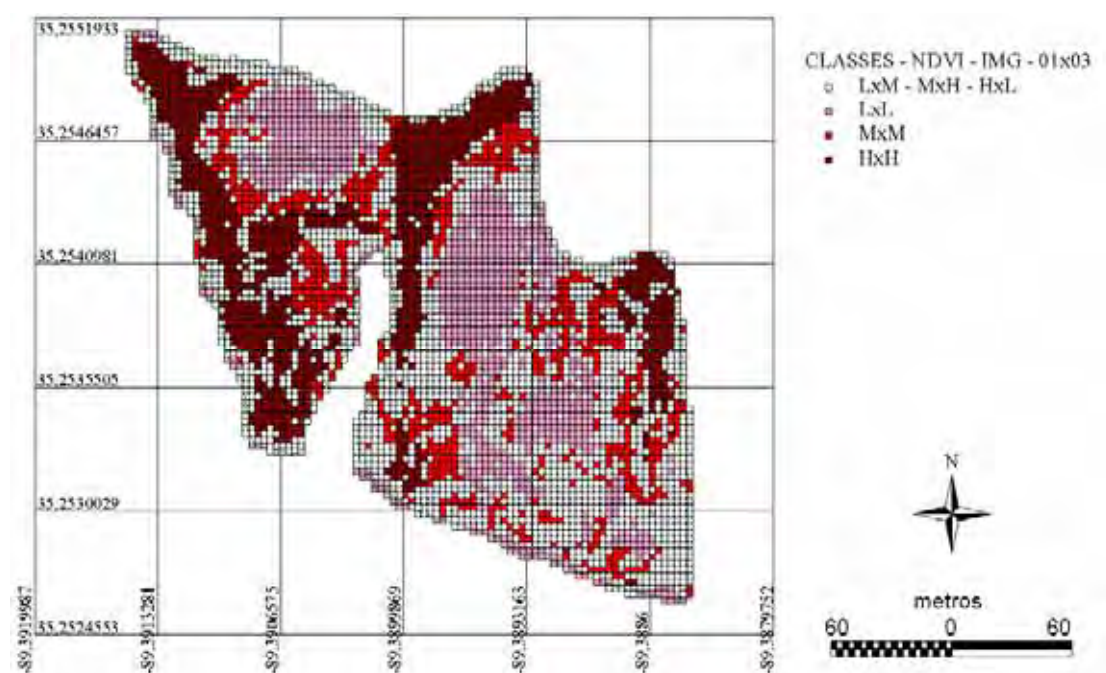


Figura 27 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

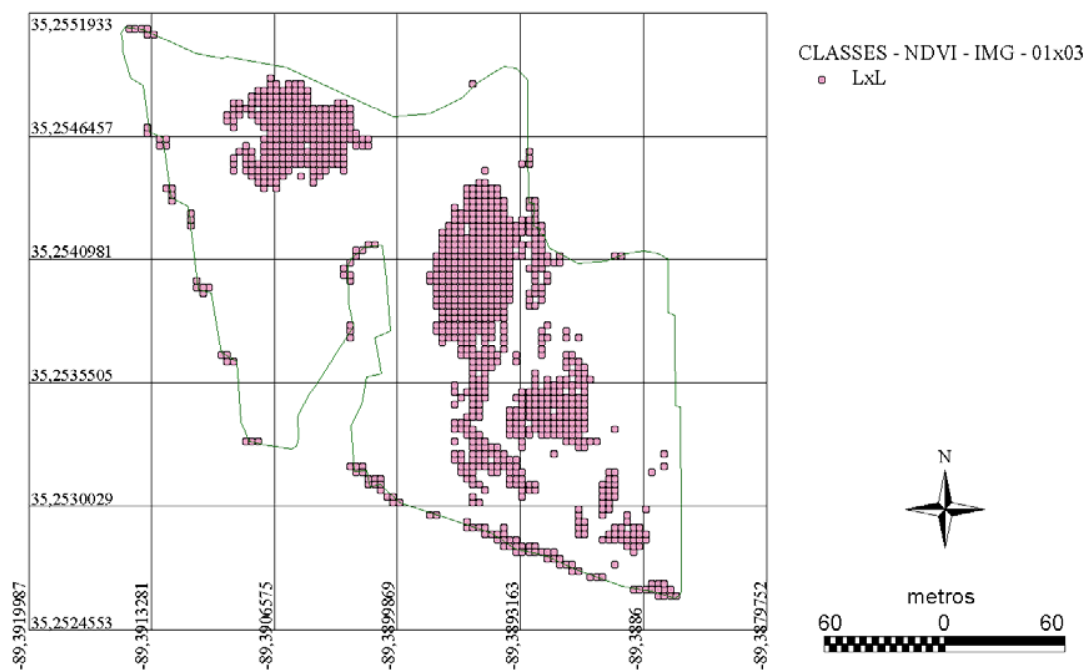


Figura 28 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.

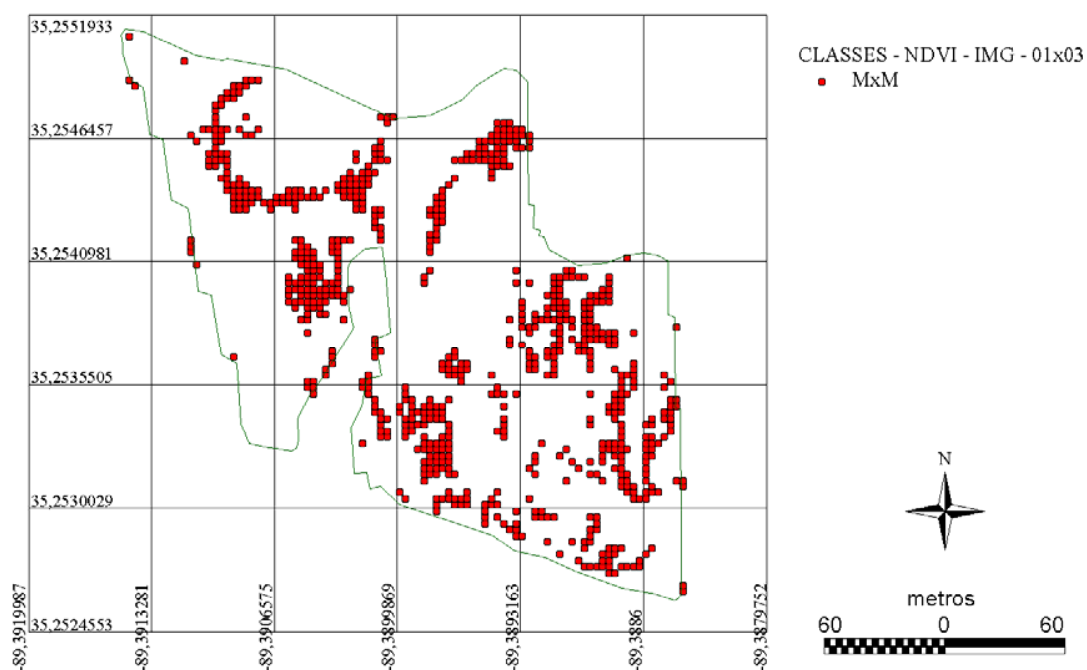


Figura 29 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.

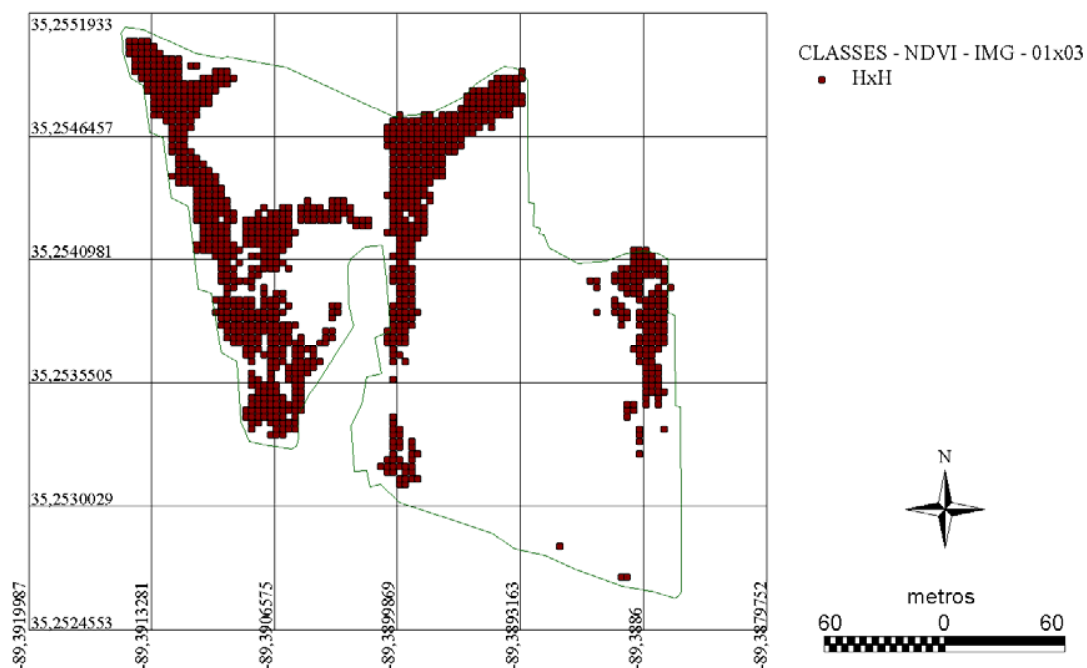


Figura 30 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.

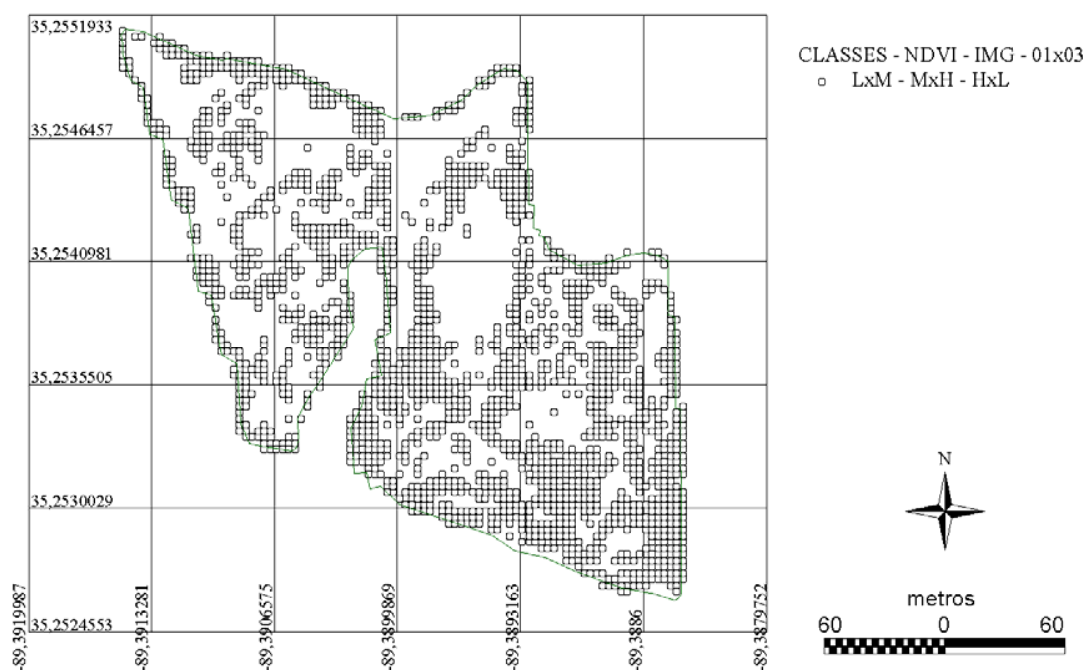


Figura 31 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 e 2003 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

6.7.3 Comparação entre as áreas de estabilidade e de transição entre 2002 e 2003

Os resultados ilustrados na Figura 32 permitiram a visualização da localização das áreas de estabilidade entre as classes de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e das áreas de transição entre as classes de baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI obtidas entre os anos de 2002 e 2003. Cabe lembrar que o ano de 2002 foi um ano mais quente que o normal e extremamente úmido, enquanto 2003 teve uma safra com temperaturas mais baixas e precipitações mais elevadas que o normal (Quadro 3).

As áreas de LxL (Figura 33) e de HxH (Figura 35) apresentaram um comportamento muito estável, com grandes blocos em manchas agregadas e poucos pontos dispersos, correspondendo a 23 e 21% do total da área, respectivamente. Parte das áreas de LxL localizadas sobre o perímetro da área pode ser resultado da classificação de baixa cobertura vegetal ou solo exposto não cultivado, diferença que deve ser levada em consideração na tomada de decisão sobre o manejo a ser adotado. As áreas de MxM (Figura 34) tiveram um padrão de pontos dispersos com localização ao redor das áreas de alto e baixo NDVI, correspondendo a 18% da área.

A soma de todas as áreas de estabilidade resultou em um valor de 62% de toda a área (Quadro 9), resultado que demonstrou significativa estabilidade das classes de NDVI no período de tempo decorrido entre os anos de 2002 e 2003.

Na Figura 36 foi possível observar que as áreas de transição LxM, MxH e HxL, com valor correspondente a 38% do total da área, estavam dispersas por quase toda a área, com uma grande mancha localizada em todo o comprimento norte-sul da região a leste da área e com pequenas manchas e pontos no restante da área. Este fato pode estar relacionado às diferenças climáticas entre os anos de 2002 e 2003, resultando em condições adversas que podem explicar parte do comportamento do vigor das plantas da área.

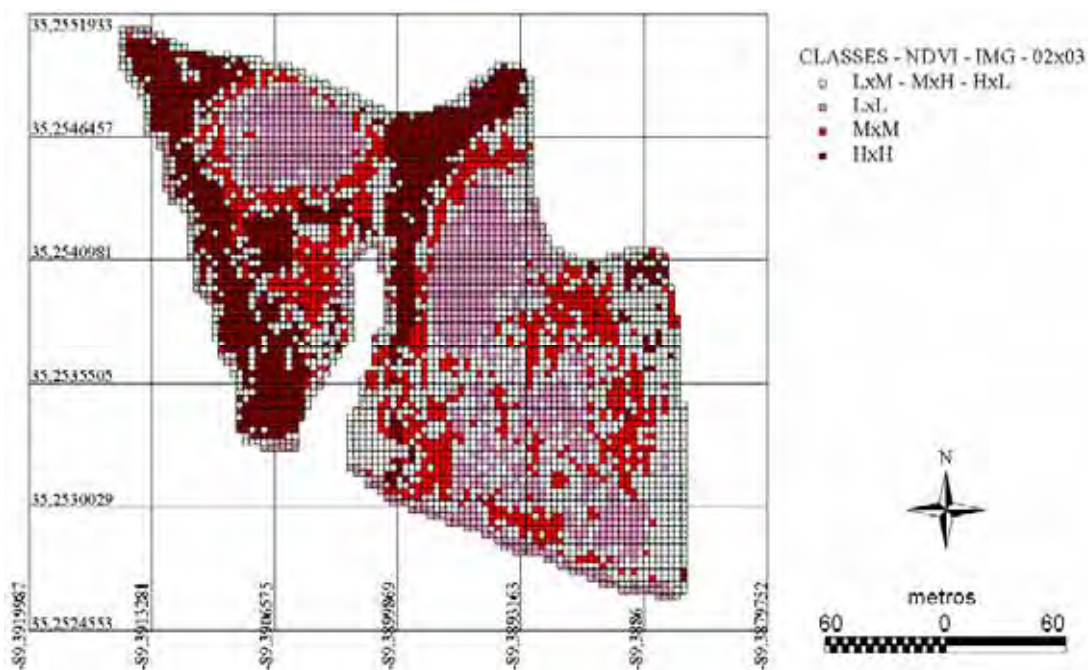


Figura 32 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL), médio (MxM) e alto (HxH) NDVI e de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

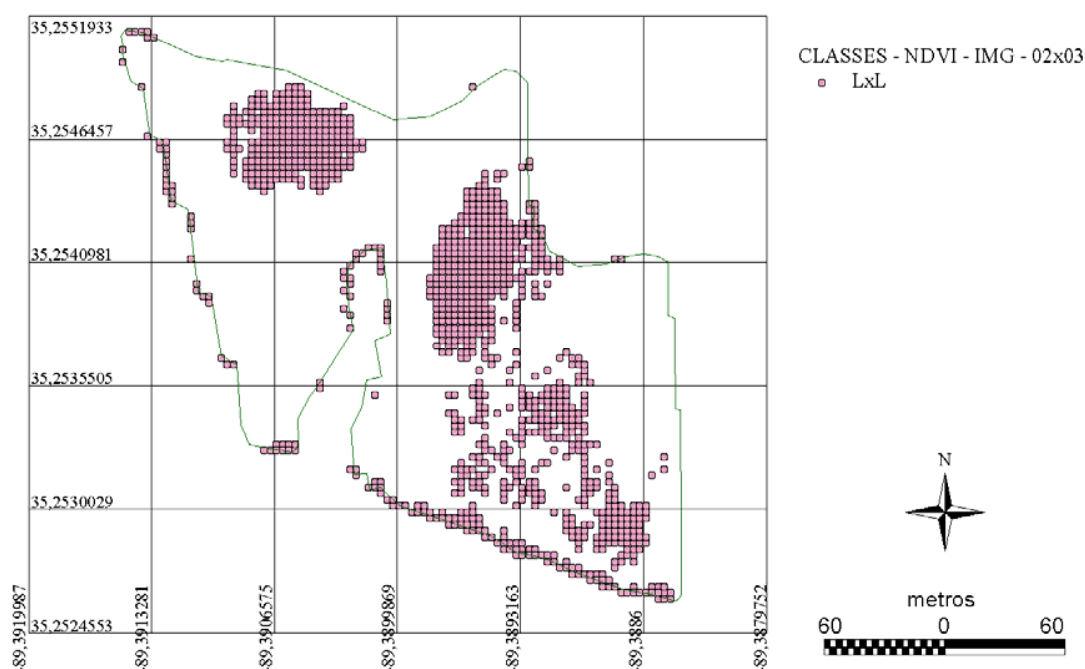


Figura 33 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de baixo (LxL) NDVI.

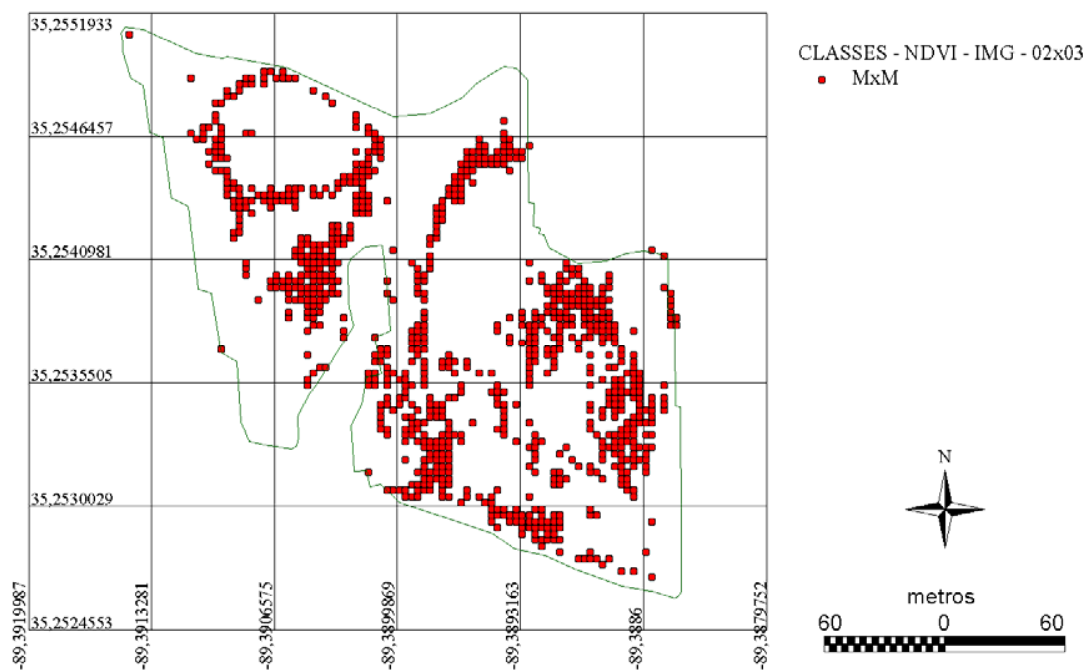


Figura 34 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de médio (MxM) NDVI.

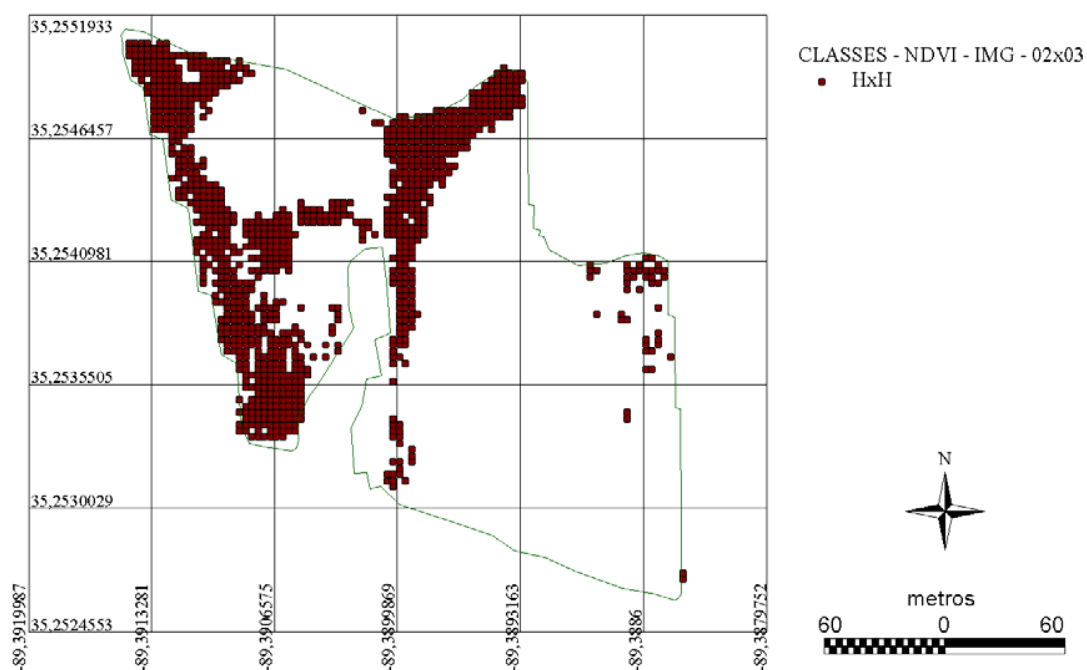


Figura 35 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de estabilidade de alto (HxH) NDVI.

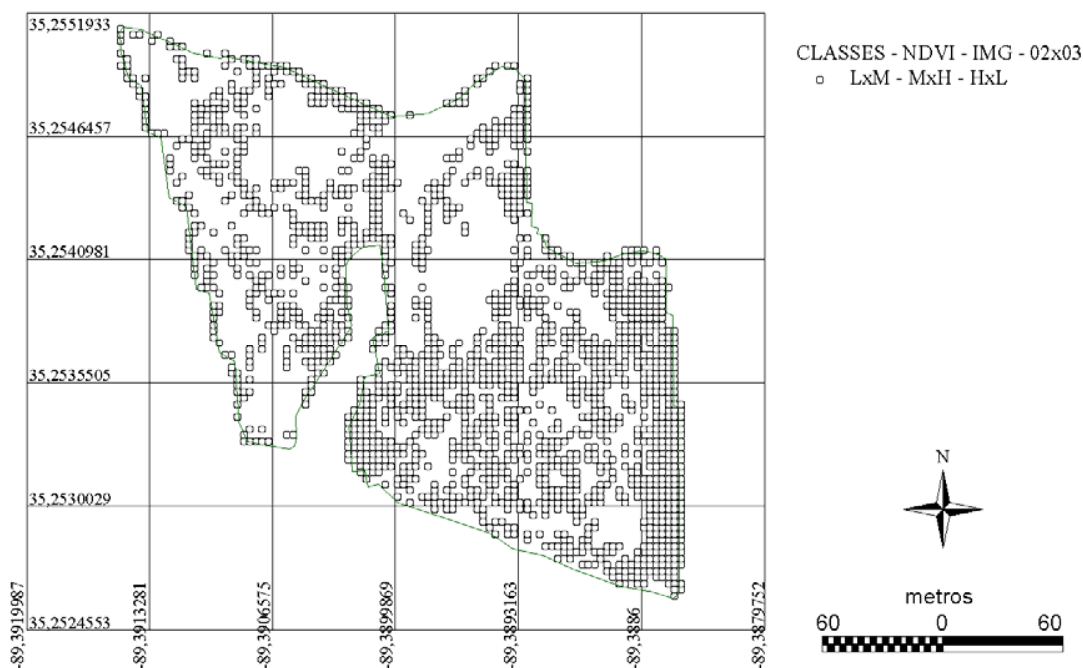


Figura 36 – Comparação entre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 e 2003 para localização de áreas de transição entre baixo e médio (LxM), médio e alto (MxH) e alto e baixo (HxL) NDVI.

6.8 Avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos nas zonas de manejo obtidas para os diferentes anos

A avaliação do resultado esperado com o uso da aplicação localizada de insumos permitiu o cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI utilizadas como zonas de manejo em um ano para a aplicação localizada em outro.

Os resultados são apresentados nas Figuras 37 a 42, pela seqüência de ilustrações: (a) das classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano utilizado na prescrição das zonas de manejo para aplicação localizada; (b) das áreas de estabilidade e de transição entre as classes do ano de prescrição sobrepostas com as do ano de aplicação; (c) da divisão das áreas de transição e seu posicionamento ao lado das classes de estabilidade; (d) do agrupamento das áreas de estabilidade e das áreas de transição manejadas corretamente para atribuição da porcentagem de acerto e erro entre a prescrição e aplicação

localizada. Os resultados observados pela ilustrações das Figuras foram auxiliados pelos valores da porcentagem de acerto (A) e de erro (E) com a suposta aplicação localizada, utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparadas com a de outro ano, apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Porcentagem de acerto (A) e de erro (E) com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparadas com a de outro ano.

Classes de NDVI	2001		2002		2001		2003		2002		2003		Média	
	x		x		x		x		x		x			
	2002		2001		2003		2001		2003		2002			
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
L – baixo	95	5	95	5	87	13	95	5	90	10	98	2	93	7
M – médio	71	29	79	21	69	31	75	25	73	27	72	28	73	27
H – alto	70	30	85	15	70	30	79	21	78	22	75	25	76	24
Média	79	21	86	14	75	25	83	17	80	20	82	18	81	19

6.8.1 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2001 e 2002

Os resultados da sequência utilizada no cálculo da porcentagem de acerto e erro esperada entre uma suposta aplicação localizada utilizando como mapa de prescrição as zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2001 e seu resultado sobre as classes de NDVI da imagem do ano de 2002 são ilustrados pela Figura 37.

As zonas de manejo de um mapa de prescrição criados para pela classes de NDVI da imagem de 2001 são ilustradas na Figura 37a, com cada uma das classes representando um valor inicial de 100%. Na Figura 37b são apresentados os resultados da sobreposição das classes de NDVI de 2001 e 2002, resultando em áreas de estabilidade entre as classes L com 72%, M com 58%, e H com 65%, e de transição entre as classes LM com 52%, MH com 43% e HL com apenas 11%. As classes de transição foram divididas e

posicionadas de acordo com sua origem no ano de 2001 (Figura 37c), com valores de 23% e 29% para a classe de LM de L e de M, respectivamente, de 13% e 30% para a classe de MH de M e de H, respectivamente, e de 5% e 5% para a classe de HL de H e L. Na Figura 37d são ilustrados os resultados finais das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H. A porcentagem de acerto para a classe L foi de 95%, resultado da soma das classes L e LM(L) da Figura 37c, com erro de 5%, representado pela classe HL (L). Para a classe M houve 71% de acerto, soma de M com MH(M), e 29% de erro, dado pela classe LM(M). O acerto para a classe H foi de 70%, soma de H com HL(H), com erro de 30%, representado pela classe MH(H). A média de acerto entre o uso das classes de 2001 para aplicação em 2002 foi de 79%, com erro em 21% da área.

6.8.2 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2002 e 2001

Os resultados da sequência de prescrição de zonas de manejo pelas classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2002 e seu resultado sobre as classes de NDVI da imagem do ano de 2001 são ilustrados pela Figura 38.

As classes L, M e H utilizadas como zonas de manejo tiveram valor inicial de 100% cada, como ilustrado na Figura 38a. Os resultados da sobreposição das classes de NDVI de 2002 e 2001 são apresentados na Figura 38b, com áreas de estabilidade entre as classes L com 69%, M com 51%, e H com 78%, e de transição entre as classes LM com 47%, MH com 43% e HL com 12%. As classes de transição foram divididas e posicionadas de acordo com sua origem no ano de 2002 (Figura 38c), com valores de 26% para LM(L) e 21% para LM(M), de 28% para MH(M) e 15% para MH(H), de 7% para HL(H) e 5% para HL(L). Na Figura 38d são ilustrados os resultados finais das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H, sendo a porcentagem de acerto para a classe L de 95% e erro de 5%. Para a classe M houve 79% de acerto e 21% de erro, e para a classe H o acerto foi de 85% e o erro de 15%. A média de acerto entre o uso das classes de 2002 para aplicação em 2001 foi de 86%, com erro em 14% da área.

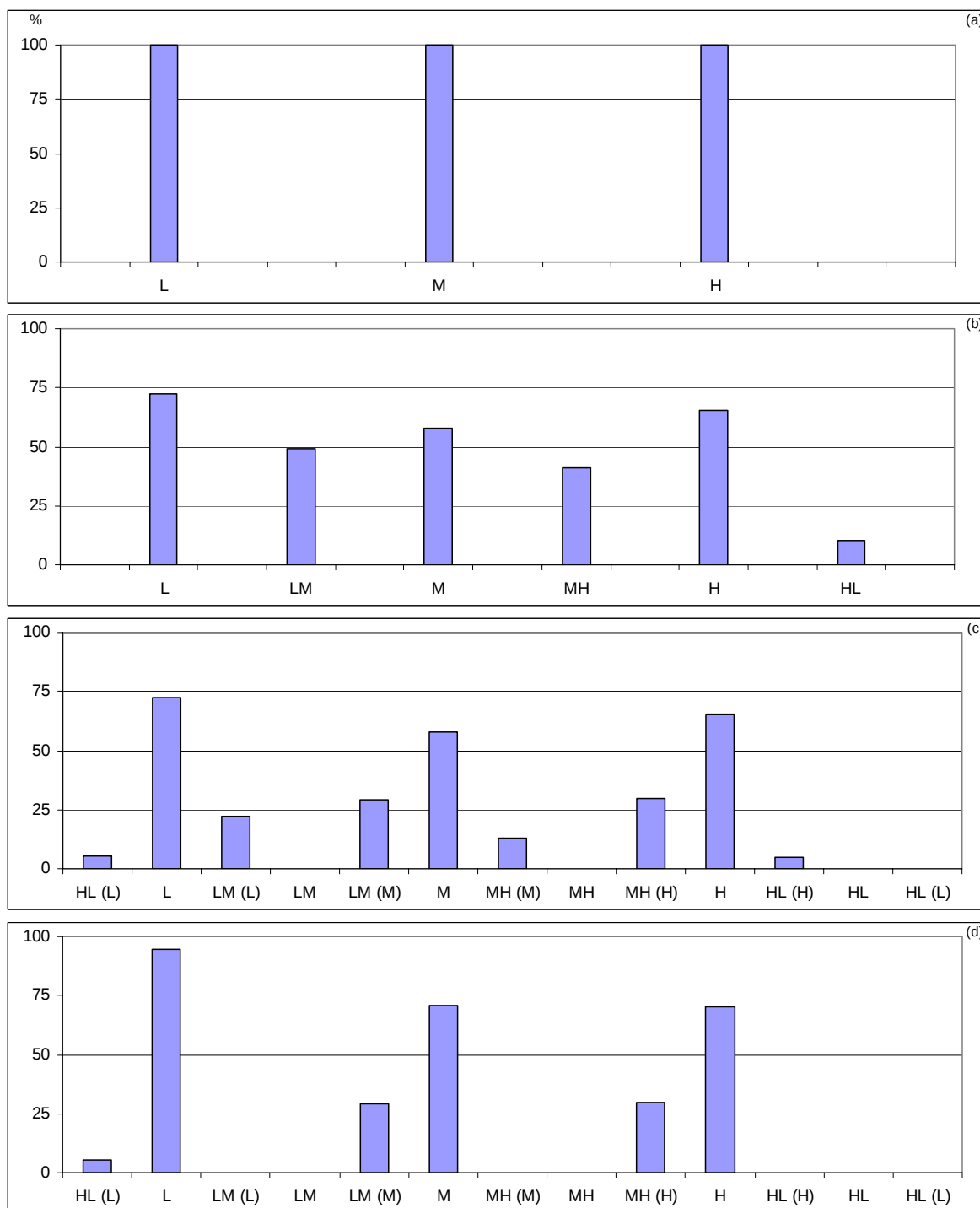


Figura 37 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2001 (a) comparada com as de 2002, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2001 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

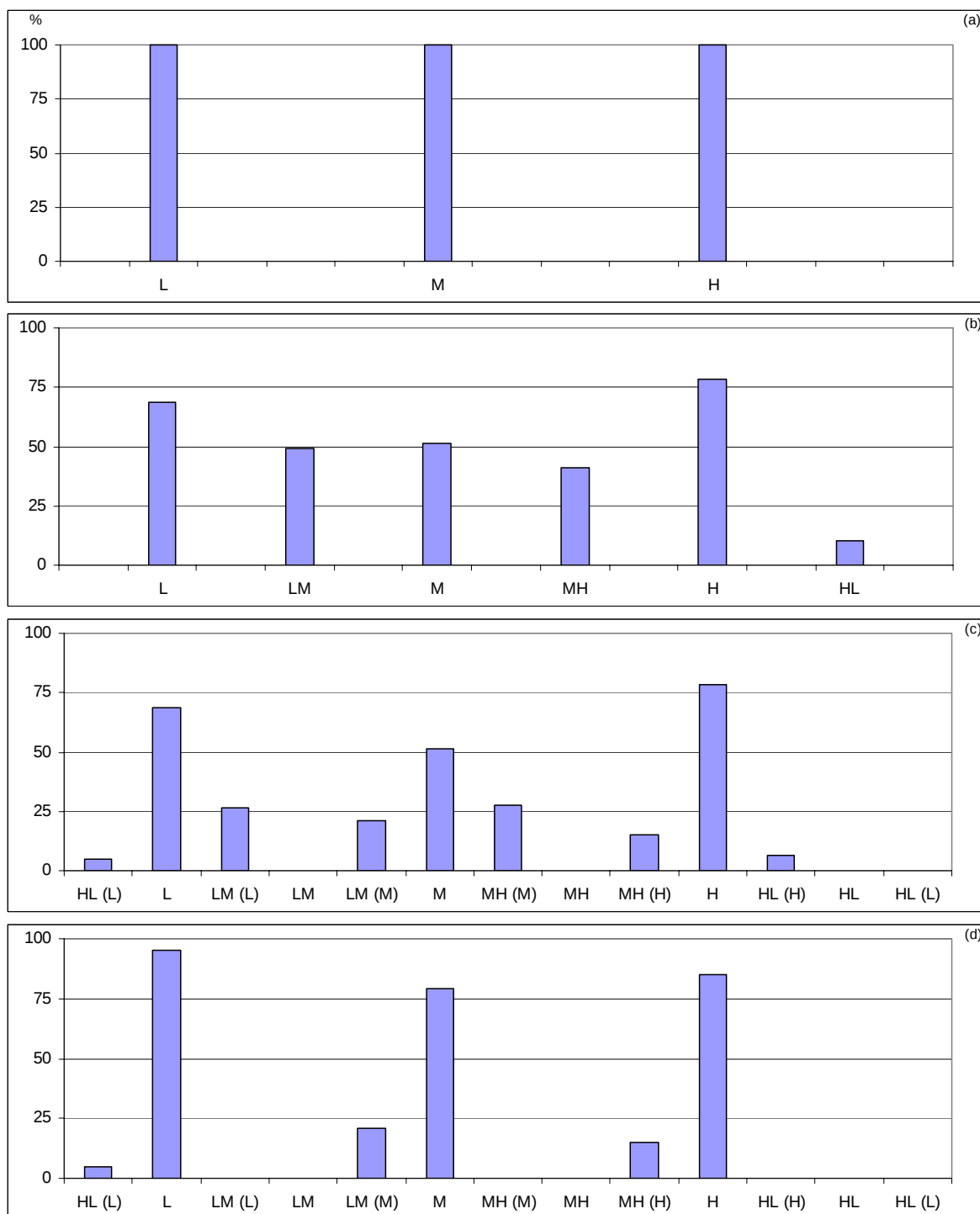


Figura 38 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2002 (a) comparada com as de 2001, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2002 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

6.8.3 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2001 e 2003

Na Figura 39a são ilustradas as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2001, com valores de 100% cada, utilizadas como base para a prescrição de suposta aplicação localizada sobre as classes de NDVI da imagem do ano de 2003. Na Figura 39b são apresentadas as áreas de estabilidade entre as classes L (62%), M (48%) e H (65%), e de transição entre as classes LM (56%), MH (51%) e HL (18%). Pela divisão das classes de transição e seu posicionamento ao lado das classes de 2001 (Figura 39c), foram obtidos os valores de 25% para a classe LM(L), de 31% para LM(M), de 21% para MH(M), de 30% para MH(H), de 5% para HL(H), e de 13% para HL(L). Na Figura 39d são ilustrados os resultados das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H, havendo para a classe L acerto de 87% e erro de 13%, para a classe M acerto de 69% e erro de 31%, para a classe H acerto de 70% e erro de 30%, configurando uma média de acerto entre todas as classes de 2001 com aplicação em 2003 de 75% contra 25% de erro.

6.8.4 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2003 e 2001

As classes L, M e H de 2003, utilizadas como zonas de manejo para aplicação sobre as classes de 2001, tem valor inicial de 100% cada, como ilustrado na Figura 40a. Os resultados da sobreposição das classes de NDVI de 2003 e 2001 são apresentados na Figura 40b, com áreas de estabilidade entre as classes L com 64%, M com 46%, e H com 66%, e de transição entre as classes LM com 56%, MH com 50%, e HL com 18%. As classes de transição foram divididas e posicionadas de acordo com sua origem no ano de 2003 (Figura 40c), com valores de 31% para LM(L) e 25% para LM(M), de 29% para MH(M) e 21% para MH(H), de 13% para HL(H) e 5% para HL(L). Na Figura 40d são ilustrados os resultados finais das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H, sendo a porcentagem de acerto para a classe L de 95% e erro de 5%. Para a classe M houve 75% de acerto e 25% de erro e para a classe H o acerto foi de 79% e o erro de 21%. A média de acerto entre o uso das classes de 2003 para aplicação em 2001 foi de 83%, com erro em 17% da área.

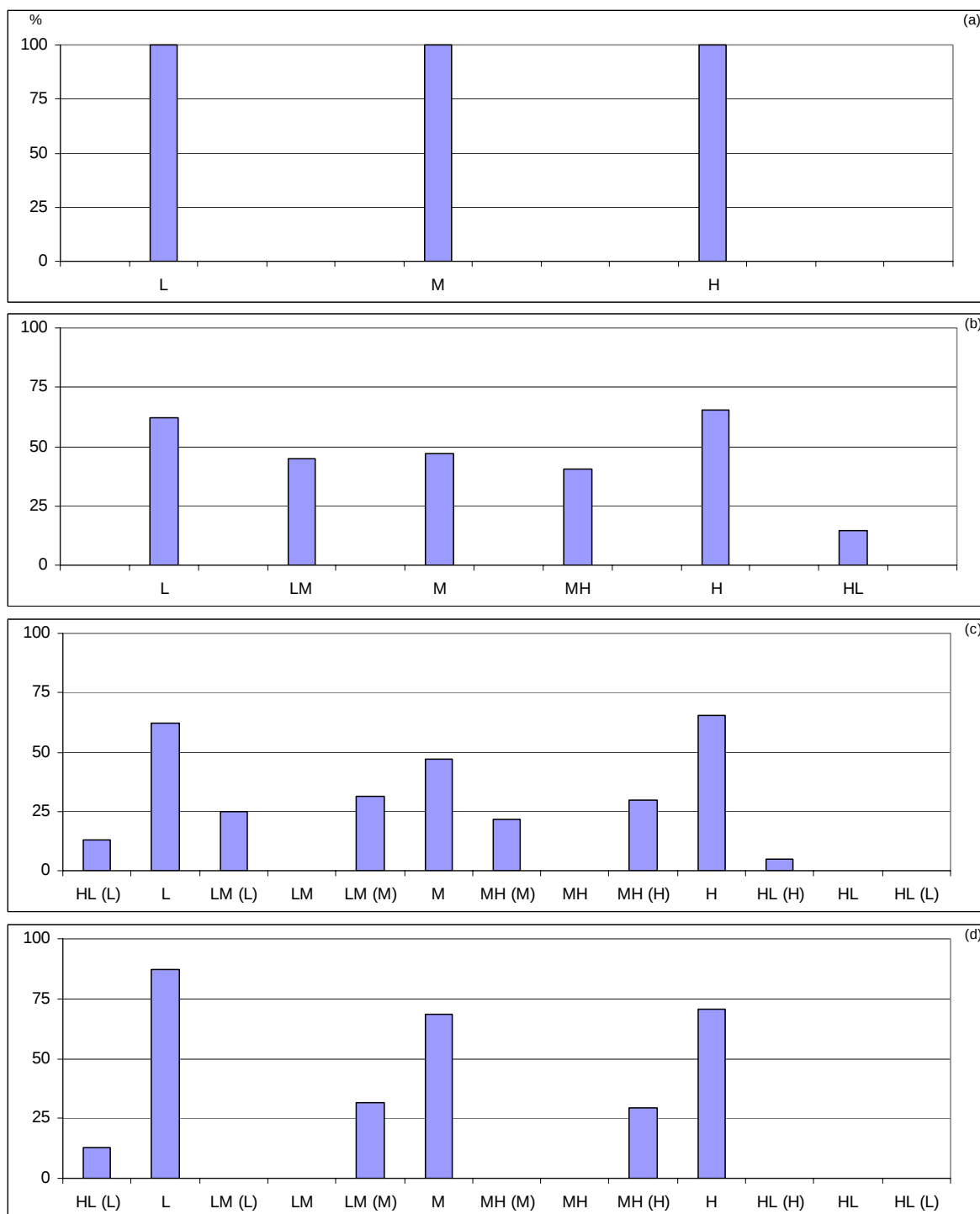


Figura 39 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2001 (a) comparada com as de 2003, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2001 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

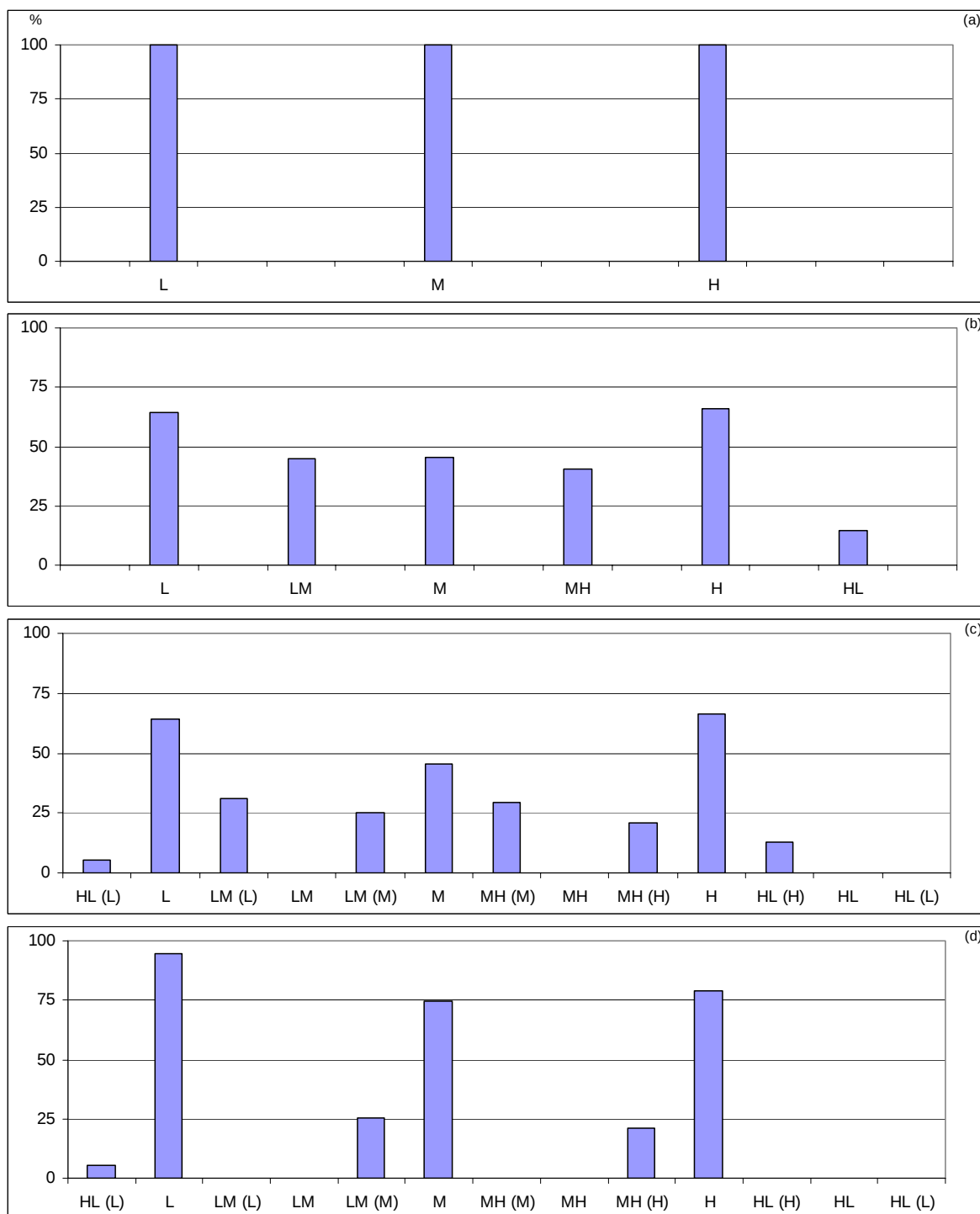


Figura 40 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2003 (a) comparada com as de 2001, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2003 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

6.8.5 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2002 e 2003

Na Figura 41a são ilustradas as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem do ano de 2002, com valores de 100% cada, utilizadas como base para a prescrição de suposta aplicação localizada sobre as classes de NDVI da imagem do ano de 2003. As áreas de estabilidade entre as classes L (64%), M (50%) e H (76%), e de transição entre as classes LM (53%), MH (45%) e HL (12%) são apresentadas na Figura 41b. O posicionamento das classes após a divisão das classes de transição com base em 2002 é ilustrados na Figura 41c, sendo os valores de 26% obtidos para a classe LM(L), de 27% para LM(M), de 23% para MH(M), de 22% para MH(H), de 2% para HL(H) e de 10% para HL(L). Na Figura 41d são ilustrados os resultados das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H de 2002 utilizadas como ponto inicial para uma aplicação localizada em 2003, havendo para a classe L acerto de 90% e erro de 10%, para a classe M acerto de 73% e erro de 27%, para a classe H acerto de 78% e erro de 22%, configurando uma média de acerto entre todas as classes de 2002 com aplicação em 2003 de 80% contra 20% de erro.

6.8.6 Porcentagem de acerto e erro esperada entre 2003 e 2002

As classes L, M e H de 2003 tem valor inicial de 100% cada, como ilustrado na Figura 42a. Os resultados da sobreposição das classes de NDVI de 2003 e 2002 são apresentados na Figura 42b, com áreas de estabilidade entre as classes L com 68%, M com 54%, e H com 64%, e de transição entre as classes LM com 58%, MH com 43%, e HL com 13%. As classes de transição foram divididas e posicionadas com base em sua origem no ano de 2003 (Figura 42c), com valores de 30% para LM(L) e 28% para LM(M), de 18% para MH(M) e 25% para MH(H), de 11% para HL(H) e 2% para HL(L). Na Figura 42d são ilustrados os resultados das porcentagem de acerto e erro para as classes de L, M e H, sendo a porcentagem de acerto para a classe L de 98% e erro de 2%. Para a classe M houve 72% de acerto e 28% de erro e para a classe H o acerto foi de 75% e o erro de 25%. A média de acerto entre o uso da classes de 2003 para aplicação em 2002 foi de 82%, com erro em 18% da área.

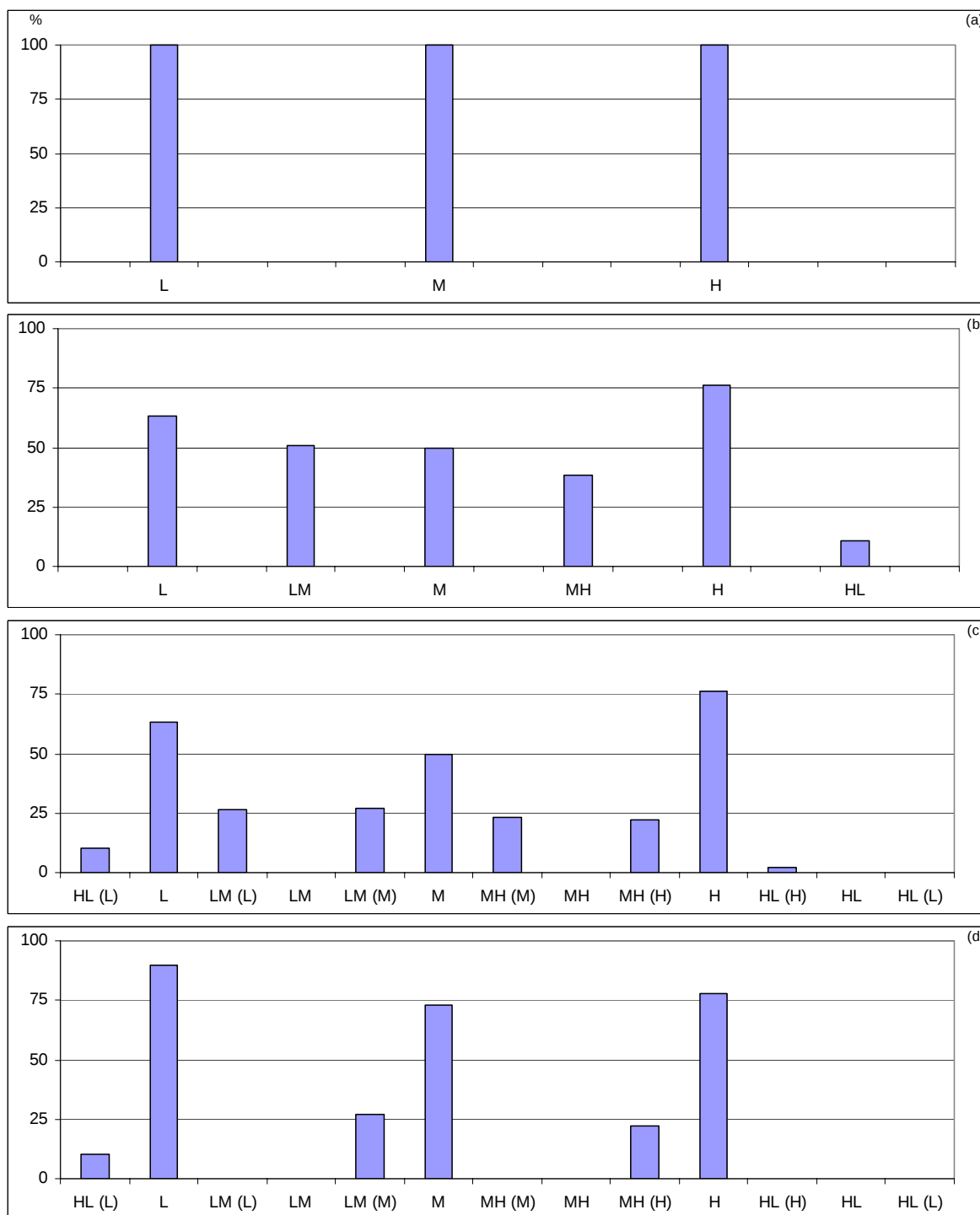


Figura 41 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2002 (a) comparada com as de 2003, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2002 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

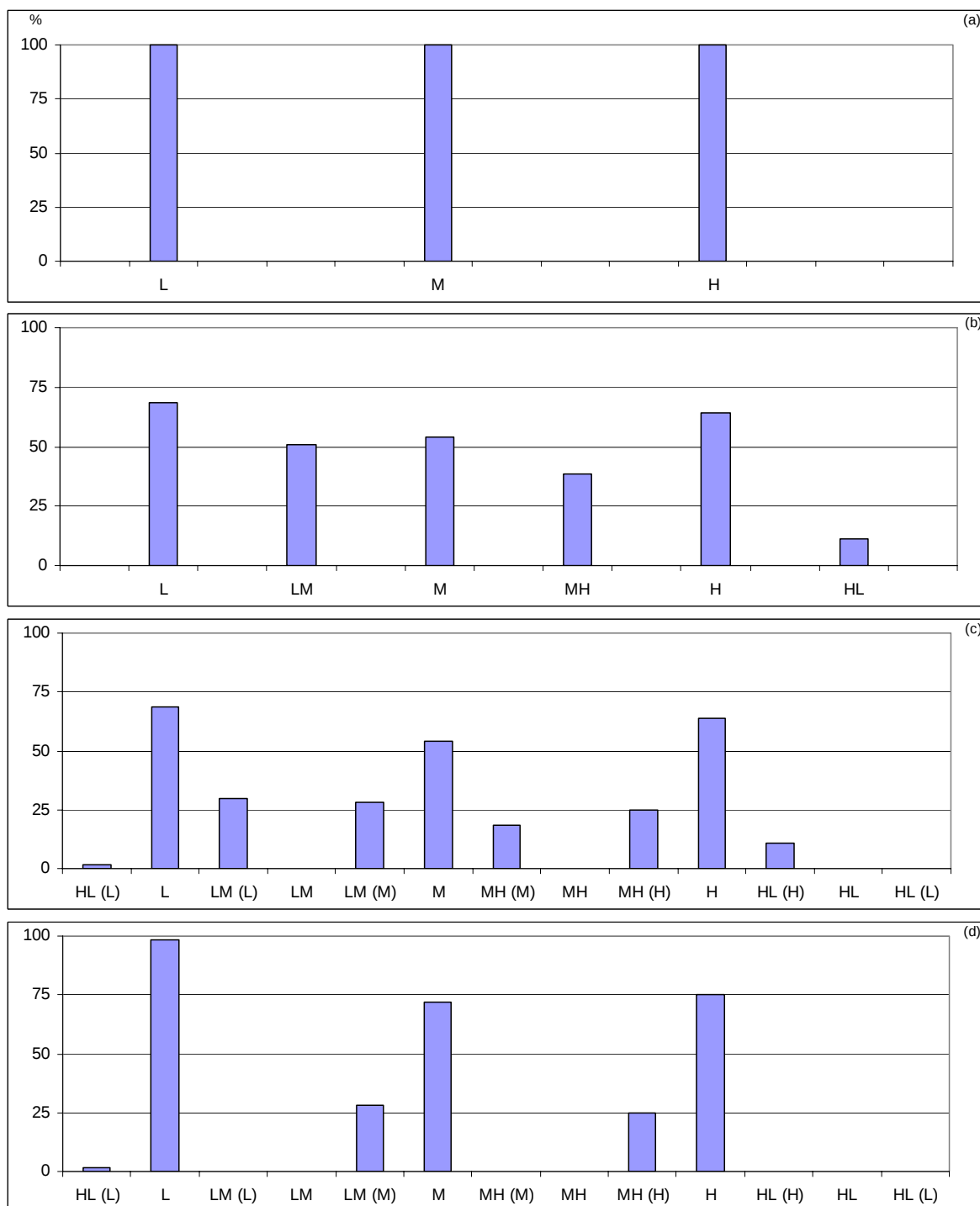


Figura 42 – Sequência de cálculo da porcentagem de acerto e erro com aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI da imagem de 2003 (a) comparada com as de 2002, localizando as zonas de transição (b), que foram divididas e posicionadas junto às classes de 2003 (c) e agrupadas para atribuição da porcentagem de acerto e erro (d).

6.8.7 Resumo geral da porcentagem de acerto e erro para todos os anos

Todos os resultados correspondentes à porcentagem de acerto e erro da classe de baixo (L), médio (M), alto (H) NDVI e da Média da área para a avaliação de uma aplicação localizada com base nas classes de NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparada com a de outro ano, duas a duas pelas seis combinações existentes entre os anos de 2001, 2002 e 2003, são resumidos na Figura 43.

A maior porcentagem média de acerto foi de 86%, resultado da comparação entre o ano de 2002 como base para aplicação em 2001, seguido dos valores de 83%, 82%, 80%, 79% e 75% para as comparações entre os anos de 2003x2001, 2003x2002, 2002x2003, 2001x2002 e 2001x2003, respectivamente.

A maior porcentagem de acerto individual em uma classe foi de 98%, resultado da utilização da classe de baixo NDVI do ano de 2003 sobre a aplicação em 2002. A menor porcentagem de acerto por classe foi de 69% para a classe de médio NDVI de 2001 com 2003.

A classe que apresentou maiores porcentagens de acertos foi a classe de baixo NDVI, com valores variando entre 98% e 87%, seguida da classe de alto NDVI, com valores entre 85% e 70%, e da classe de médio NDVI, com valores entre 79% e 69%.

Independentemente do ano escolhido para utilização das classes de NDVI como zonas de manejo na prescrição de uma aplicação localizada, os resultados de acerto sempre foram superiores a 75%. Estes resultados permitem concluir que a atividade de aplicação localizada de insumos possa ser iniciada em qualquer ano com base em uma imagem multiespectral obtida em um ano anterior.

O resultado para a média geral da porcentagem de acerto e erro de todas as seis combinações entre as classes de NDVI de imagens comparadas duas a duas para os anos de 2001, 2002 e 2003, ilustrado na Figura 44, mostrou uma possibilidade de 81% de acerto com uso da aplicação localizada de insumos, com apenas 19% de erro na aplicação de doses sobre as zonas de manejo.

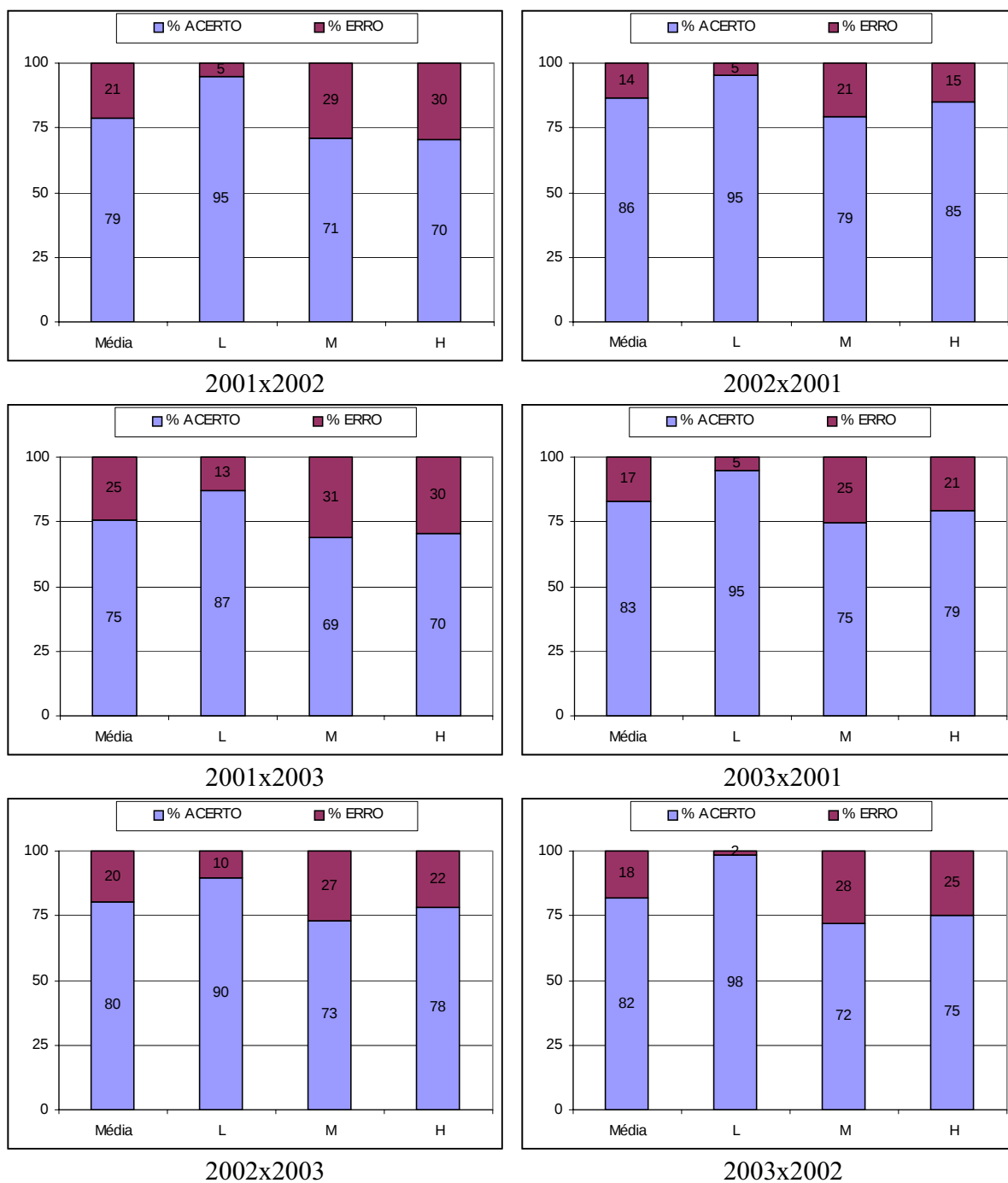


Figura 43 – Porcentagem de acerto e de erro para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI e para a Média da área com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de NDVI obtidas pela imagem de um ano quando comparada com a de outro ano, duas a duas para os anos de 2001, 2002 e 2003.

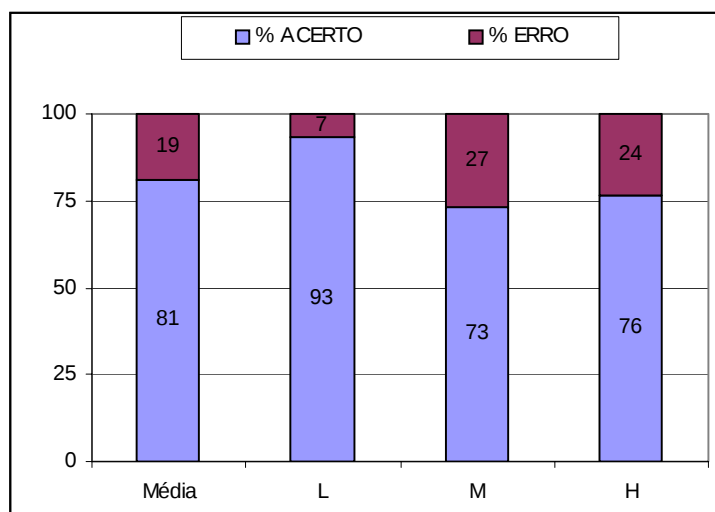


Figura 44 – Porcentagem de acerto e de erro para as classes de baixo (L), médio (M) e alto (H) NDVI e para a Média da área com a suposta aplicação localizada utilizando como zonas de manejo as classes de NDVI obtidas pela média das seis combinações entre as imagens de um ano quando comparada com a de outro ano, duas a duas para os anos de 2001, 2002 e 2003.

6.9 Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros

Todas as atividades realizadas neste estudo utilizaram equipamentos, produtos e programas disponíveis comercialmente e de fácil acesso e uso por parte do público de produtores de algodão.

As imagens multiespectrais podem ser compradas de empresas prestadoras de serviços de aquisição de imagens aéreas e por empresas distribuidoras de imagens de satélite. A classificação das imagens pode ser realizada com a utilização de vários programas ou sistemas de informação geográfica também disponíveis no mercado.

Após a identificação de zonas de manejo dentro das áreas de algodão é possível tomar decisões relacionadas à aplicação localizada de insumos para a uniformização do vigor das plantas, redução de custos com insumos e aumento da produtividade.

A operação de semeadura pode ser realizada com a redução do número de sementes distribuídas nas classes de baixo NDVI para reduzir a competição entre as plantas e com isso elevar o vigor das mesmas. A aplicação localizada de sementes com taxas variadas

de acordo com sua classe de manejo pode ser realizada através da utilização de semeadoras comuns com controladores hidráulicos da velocidade do eixo de distribuição das sementes acionados de acordo com a posição do conjunto trator semeadora dentro da área e do mapa de prescrição das quantidade de sementes a serem aplicadas em cada classe de manejo baseada nas classes de NDVI obtidas pela imagem de um ano anterior ao plantio. A redução da quantidade de sementes aplicadas permite a redução de inseticidas e fungicidas aplicados no sulco de semeadura ou no tratamento das sementes, resultando em significativa economia.

As quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura sobre as áreas podem ser reduzidas nas áreas de alto NDVI, uma vez que as plantas encontradas nesta classe apresentam excesso de vigor.

Em função do elevado vigor das plantas de algodão, caracterizado por plantas mais altas que o normal e com relação altura/número de nós no caule principal também elevada, existe uma maior quantidade de insetos nas classes de alto NDVI, insetos estes atraídos por plantas e maçãs mais tenras e pouco lignificadas. A aplicação localizada de inseticidas pode ser realizada com base no nível de dano econômico causado pelos insetos amostrados em cada classe de NDVI, e com isso grandes quantidades de inseticidas podem ser economizadas pela não aplicação ou redução das quantidades aplicadas em regiões com plantas de baixo vigor, como as encontradas na classe de baixo NDVI.

A aplicação de reguladores de crescimento visa a obtenção do equilíbrio entre a altura esperada e a altura observada das plantas de algodão. A aplicação localizada de reguladores de crescimento pode ser realizada com base nas classes de NDVI, com redução da dose aplicada na classe de médio NDVI e não aplicação na classe de baixo NDVI, para que ocorra a uniformização entre o crescimento das plantas das diferentes regiões de manejo.

A uniformização das características das plantas encontradas nas diferentes zonas de manejo pode vir a permitir um única passagem da colhedora de algodão sobre a área, evitando o repasse da colhedora para a colheita do algodão de maçãs que levaram mais tempo para abrir. A redução do vigor das classes de alto NDVI e o aumento do vigor das classes de baixo NDVI pode reduzir a diferença de tempo entre a abertura das maçãs das plantas encontradas nestas zonas de manejo e com isso garantir uma maior uniformidade no momento da colheita.

A aquisição das características espectrais das plantas nas regiões do verde, vermelho e infravermelho próximo pode ser realizada por sensores multiespectrais desenvolvidos para a coleta durante o caminhar de uma pessoa dentro de uma área de algodão ou até mesmo por sensores acoplados na barra porta bicos de pulverizadores.

Trabalhos ainda precisam ser realizados para demonstrar a possibilidade de aplicação localizada de insumos em tempo real pela aquisição das características espectrais das plantas, classificação das mesmas pelos índices de vegetação, e aplicação de diferentes doses de inseticidas, fertilizantes, reguladores de crescimento, baseadas nas necessidades expressadas pelas plantas de cada zona de manejo.

Sensores multiespectrais acoplados em pulverizadores ainda podem auxiliar na classificação das diferenças das plantas dentro das zonas de manejo obtidas pelas classes de NDVI das imagens aéreas. Esta técnica pode servir para refinar o tratamento dentro das classes de NDVI para obter um resultado melhor dentro das classes de transição encontradas entre as classes de estabilidade pela sobreposição de imagens de um ano para outro.

O mapeamento da produtividade realizado durante a colheita do algodão pode servir como um indicativo da variabilidade entre as plantas e auxiliar na prescrição de doses de insumos a serem aplicados nas diferentes zonas de manejo obtidas pela classificação das imagens.

7 CONCLUSÕES

Para as condições de realização deste trabalho são válidas as conclusões seguintes.

Foi possível identificar zonas de manejo para a cultura do algodão com a utilização de imagens aéreas multiespectrais.

A classificação das imagens multiespectrais pelo índice de vegetação com diferenças normalizadas (NDVI) permitiu a divisão da área em três classes com características semelhantes em todos os anos.

A classe de alto NDVI dos três anos avaliados foi caracterizada por plantas mais altas, com maior número total de nós no caule principal e maior número total de maçãs por planta, quando comparadas com as plantas da classe de baixo NDVI.

Não houve diferença no estande das plantas entre as classes de baixo e alto NDVI para os três anos e todas as classes tiveram o mesmo estande de plantas nos anos de 2001 e 2003, conforme o esperado pela semeadura com distribuição uniforme de sementes.

A classificação das imagens em cinco classes de NDVI permitiu a verificação da amostragem de plantas em áreas de transição entre as classes.

Uma melhor amostragem a campo pode vir a ser realizada pela classificação das imagens em cinco classes de NDVI para amostragem em três classes (baixo, médio, alto NDVI) e utilização das duas classes intermediárias (baixo-médio, médio-alto NDVI) como zonas de transição ou faixa de segurança entre as classes amostradas.

A comparação entre as classes de NDVI para todos os anos confirmou a estabilidade das zonas de manejo no tempo e no espaço.

Pela sobreposição das classes de NDVI entre as imagens foi possível avaliar a localização das áreas de estabilidade e de transição entre as classes de NDVI.

Foi possível avaliar as implicações do uso das classes de NDVI como zonas de manejo em um ano para prescrição da aplicação localizada de insumos em outro ano pelo cálculo da porcentagem de acerto e erro entre a localização das classes de NDVI.

A porcentagem de acerto média para todas as classes nas comparações entre todos os anos dois a dois foi de 81% de acerto com uso da aplicação localizada de insumos para aplicação de doses variáveis sobre as zonas de manejo.

A aplicação localizada de insumos pode ter início a qualquer ano com base em uma imagem multiespectral obtida em um ano qualquer.

É possível a utilização das classes de NDVI como zonas de manejo para aplicação localizada de insumos (como fertilizantes, inseticidas, reguladores de crescimento, desfoliantes) para o controle das diferenças no vigor de crescimento apresentado pelas plantas de algodão das diferentes classes de NDVI.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERS, D. W. **Cotton plant development and plant mapping**. Columbia: University of Missouri, 1999. 7 p. Disponível em: <<http://muextension.missouri.edu/explore/agguides/crops/g04268.htm>>. Acesso em: 23 set. 2003. (G4268)

ANTUNIASSI, U. R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: TECNOLOGIA E SEGURANÇA NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS, 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1998. p. 53-63.

ANTUNIASSI, U. R. Maquinaria e equipamentos de suporte à aplicação localizada de recursos. In: CONGRESSO DE TECNOLOGIA E COMPETITIVIDADE DA SOJA NO MERCADO GLOBAL, 2000, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Fundação Mato Grosso, 2000. p.27-35.

ANTUNIASSI, U. R. **Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão**. 1999. 83 p. Tese (Livre Docência / Mecanização Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

ANTUNIASSI, U. R.; GADANHA JÚNIOR, C. D. Aplicação localizada de produtos fitossanitários. In: BOREM, A. **Agricultura de precisão**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 181-202.

BACHELER, J. S. **A scout's guide to basic cotton terminology**. North Carolina: North Carolina State University, 1994. "não pag.". Disponível em: <<http://ipm.ncsu.edu>>. Acesso em: 23 set. 2003.

BACHELER, J. S. Cotton terminology. In: EDMISTEN, K. L. et al. **Cotton production guide**. North Carolina: North Carolina State University, 2003. p. 207-16. Disponível em: <<http://cipm.ncsu.edu>>. Acesso em: 23 set. 2003.

BAIO, F. H. R. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas**. 2001. 113 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

BAJWA, S. G. et al. Soil characterization in agricultural fields using hyperspectral image data. **ASAE Paper**. 13 p. 2001. (Paper 01-1106)

BALASTREIRE, L. A. Aspectos gerais da agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 1999, Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA, 1999. p. 251-6.

BALASTREIRE, L. A. Histórico, definições e conceitos básicos. In: __. **Agricultura de precisão**. Piracicaba: s. n., 1998a. p. 1-8.

BALASTREIRE, L. A. Sistemas de posicionamento. In: __. **Agricultura de precisão**. Piracicaba: s.n., 1998b. p. 9-38.

BALL, S. T. **Cotton crop monitoring: terminology**. New Mexico: New Mexico State University, 1998. “não pag.”. Disponível em: <<http://www.cahe.nmsu.edu>>. Acesso em: 23 set. 2003. (Guide A-222)

BAUGH, B. et al. Validation of Cotman rules in the Texas High Plains. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 481-4.

BENSON, N. R. et al. On farm validation of Cotman defoliation rules. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2000, San Antonio. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2000. p. 706-8.

BENSON, N. R. et al. Validation of the insecticide termination component of Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 1133-5.

BETHEL, M. et al. Image-based, variable rate plant growth regulator application in cotton at Sheely farms in California. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 1755-71.

BETHEL, M. et al. Spatially variable insecticide research in cotton based on remotely sensed imagery. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2002. 15 p.

BLACKMORE, B. S.; LARSCHEID, G. Strategies for managing variability. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick, UK. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. v. 2, p. 851-9.

BROULIK, B. L. et al. Weed detection in field corn using high resolution multispectral digital imagery and field scouting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul, Minnesota. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1999. p. 1409.

CARDINA, J.; DOOHAN, D. J. Weed biology and precision farming. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 25, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

CASSINI UVIS description-basic: electromagnetic spectrum. Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, p. 1, 2005. Disponível em: <<http://lasp.colorado.edu/cassini/questions/Electromagnetic Spectrum.htm>>. Acesso em: 09 set. 2005.

CLAY, D. E.; CARLSON, C. G.; CHANG, J. Determining the 'best' approach to identify nutrient management zones. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 41, p. 1-4, 2004. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 09 set. 2005.

CLAY, D. E. et al. Collecting representative soil samples for nitrogen and phosphorus fertilizer recommendations. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 38, p. 1-4, 2002. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

CLAY, D. E. et al. Identifying good candidates for precision phosphorus management. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 13, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

CLAY, S.; JOHNSON, G. Scouting for weeds. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 15, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

COCHRAN, .M. et al. Sampling issues for Cotman data collection. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 463.

COTMAN. **Getting Started with COTMAN for Windows**. Version 2 (3.2.04). Fayetteville: University of Arkansas, 1999, 11 p. Disponível em: <<http://www.uark.edu/depts/cotman>>. Acesso em: 23 set. 2003.

COTMAN. **Pocket field guide**. Fayetteville: University of Arkansas, 2003. p. 1-8. Disponível em: <http://www.uark.edu/depts/cotman/COTMAN_Pocket_Field_Guide.pdf>. Acesso em: 23 set. 2003.

DALSTED, K. et al. Selecting the appropriate satellite remote sensing product for precision farming. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 40, p. 1-4, 2003. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 09 set. 2005.

DALSTED, K.; QUEEN, L. Interpreting remote sensing data. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 26, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

DIAS, G. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C. Automação e instrumentação para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA / SIMPÓSIO SOBRE MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 27., 1998, Poços de Caldas. **Trabalhos apresentados...** Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p. 71-108.

DIKER, K.; BAUSCH, W. C.; HEERMANN, D. F. Monitoring temporal changes of irrigated corn by aerial images. **ASAE Paper**. 12 p. 2001. (Paper 01-1144)

DOERGE, T. A.; KITCHEN, N. R.; LUND, E. D. Soil electrical conductivity mapping. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 2, p. 1-4, 2000. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

DOERGE, T. A. Management zone concept. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 2, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

DUPONT, J. K. et al. Spatially variable insecticide applications through remote sensing. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2000, San Antonio. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2000. p. 426-30.

EASTMAN, J. R. **IDRISI 32 for Windows: user's guide**. Version 2.0. Massachusetts: Clark University, 1997. "não pag."

EDMISTEN, K. L. The cotton plant. In: EDMISTEN, K. L. et al. **Cotton production guide**. North Carolina: North Carolina State University, 2003. p. 9-20. Disponível em: <<http://cipm.ncsu.edu>>. Acesso em: 23 set. 2003.

ELIAS, A. I. **Mapeamento da colheita mecanizada de grãos utilizando um sistema de posicionamento global**. 1998. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

ELIAS, A. R. **Técnicas de geoprocessamento na avaliação de métodos de levantamento de dados a campo para a agricultura de precisão**. 2003. 150 p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

ELLSBURY, M. M.; KRELL, R. Spatial variability in corn and soybean insect pests: precision farming and insect pest management for the future. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 27, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

ERDAS INC. **Erdas imagine: tour guide**. Version 8.0. Atlanta: ERDAS Inc., 1997.

ESQUERDO, J. C. D. M. **Adaptação de um pulverizador convencional para a aplicação localizada de defensivos agrícolas.** 2002. 98 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ESRI INC. **Understanding GIS: the Arc/Info Method.** Redlands: Environmental Systems Research Institute Inc., 1995.

FEKETE, A. Fertilizer application rate control for precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 6., 1996. **Proceedings...** "s.n.t.", 1996. p. 557-62.

FRANZEN, D. W.; KITCHEN, N. R. Developing management zones to target nitrogen applications. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 5, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

FRIDGEN, J. J. et al. Farm level spatially-variable insecticide applications based on remotely sensed imagery. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2002. 13 p.

FROMME, D. D. Utilizing Cotman for defoliation timing and the management of micronaire values. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 529.

HAYES, L. C.; PRIVETTE III, C. V. Potencial benefits of precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 1997. **Proceedings...** "s.n.t.", p. 70-8.

HERBERT, A. et al. Using Cotman to evaluate nitrogen application to thrips damaged cotton. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 1077-8.

HUMBURG, D. Standardization and precision agriculture – ‘the promised land’. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 8, p. 1-4, 1999a. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

HUMBURG, D. Variable rate equipment – technology for weed control. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 7, p. 1-4, 1999b. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

INPE. **Apostila de curso – Spring 3.3 versão windows**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999. “pág. irreg.”. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

JARRELL, J. et al. Cotman evaluation of new cotton cultivars in the Texas High Plains. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. “não pag.”.

JARRELL, J. et al. Growth comparison of transgenic and conventional cotton cultivars using Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2002. “não pag.”.

JOHANNSEN, C. J. et al. Potential applications of remote sensing. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 22, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

JURSCHIK, P. Information management for precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick, UK. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. v. 2, p. 477-84.

KELLEY, S. R. et al. Cotman irrigation termination studies. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2000, San Antonio. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2000. p. 687.

KHARBOUTLI, M. S.; ALLEN, C. T. Insecticide termination regimes in Southeast Arkansas
In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis:
National Cotton Council, 2001. p. 1103-4.

LAMB, D. W.; WEEDON, M.; REW, L. J. Evaluating the accuracy of mapping weeds in
seedling crops using airborne digital imaging: Avena spp. in seedling triticale. **Weed Res.**,
v. 39, p. 481-92, 1999.

LANÇAS, K. P.; PEREIRA, F. J. S.; ACOSTA, J. J. B. Estudo de caso: avaliação da
compactação do solo. In: USO RACIONAL DA ÁGUA E CONSERVAÇÃO DO SOLO EM
ÁREAS IRRIGADAS SOB PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL, 2005, Botucatu.
Boletim técnico... Botucatu: Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, 2005.
p. 35-48.

LEMS, J. et al. Yield monitors – basic steps to ensure system accuracy and performance.
Site-Specific Management Guidelines, n. 31, p. 1-4, 2000. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

LEONARD, B. R. et al. Prospects of insect management using remote sensing and variable
rate technology. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...**
Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 121-4.

LEWIS, D. et al. Image-based site-specific plant growth regulator (SSPGR) applications at
Perthshire farms. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...**
Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 1772-86.

LEWIS, D. et al. Spatially variable plant growth regulator (SVPGR) applications based on
remotely sensed imagery. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta.
Proceedings... Memphis: National Cotton Council, 2002. 15 p.

LI, H. et al. Temporal patterns of cotton reflectance and NDVI-days lint yield modeling. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 590-4.

LOCH, C. **A interpretação de imagens aéreas: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais.** Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2001. 118 p.

MALZER, G. L.; MULLA, D. J.; MURRELL, T. S. Getting specific with site-specific nutrient management. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 23, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA / SIMPÓSIO SOBRE MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 27., 1998, Poços de Caldas. **Trabalhos apresentados...** Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p. 109-58.

MARQUES JR., J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA / SIMPÓSIO SOBRE MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 27., 1998, Poços de Caldas. **Trabalhos apresentados...** Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p. 31-70.

MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of cotton plant development. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 5, n. 2, p. 243-7, 2001.

MCFALL, M. et al. Examination of production and Cotman records on a large Arkansas farm: a foundation for area-wide insect management. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. “não pag.”.

MEMPHIS CLIMATOLOGICAL DATA. **Preliminary local climatological data.** Memphis: SRH NOAA GOV., 2004. Disponível em: <<http://www.srh.noaa.gov/meg/memcli.html>>.

Acesso em: 10 jan. 2004.

MICROSOFT CORPORATION. **Excel 2000.** Version 9.0.3821 SR-1. Santa Rosa: Microsoft Corporation, 1985.

MICROSOFT CORPORATION. **Word 2000.** Version 9.0.3821 SR-1. Santa Rosa: Microsoft Corporation, 1983.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. **Eng. Agric.(Jaboticabal)**, v. 17, n. 2, p. 97-107, 1997a.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte II: Diagnóstico, aplicação localizada e considerações econômicas. **Eng. Agric.(Jaboticabal)**, v. 17, n. 2, p. 108-21, 1997b.

MONICO, J. F. G. O sistema de posicionamento global (GPS): conceitos preliminares. In: __. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: UNESP, 2000. p. 19-57.

MONKS, C. D. et al. **Monitoring cotton growth and development in Alabama.** Alabama Cooperative Extension System: Alabama A&M University and Auburn University, 1996. p.1-7. Disponível em: <<http://www.aces.edu/dept/extcomm/publications/anr/anr-995/anr-995.htm>>. Acesso em: 23 set. 2003.

MOUNT, H. R. Obtaining soil information needed for site-specific management decisions. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 35, p. 1-4, 2001. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

NORDMEYER, H.; HAUSLER, A.; NIEMANN, P. Patchy weed control as an approach in precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick, UK. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. v.2, p. 307-14.

OJALA, J. et al. Ag 20/20 Project in California: adapting remote sensing technology to cotton production. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 650-5.

OOSTERHUIS, D. M. et al. Characterization of the target growth curve used in Cotman (TM): regional project summary. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 544.

OOSTERHUIS, D. M. et al. Early-season decisions about cotton plant growth, square shed, plant growth regulator and utility of Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 628-9.

PAICE, M. Patch spraying. **Agricultural Engineer Inc.**, p. 112, 1993.

PETERSON, W. M.; VARCO, J. J. Utilization of remote sensing to detect fertilizer nitrogen effects on cotton growth. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 568-9.

PHIPPS, B. J.; PHILLIPS, A. S.; TANNER, B. Evaluation of four commonly used methods of timing the application of harvest aid products. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2002. “não pag.”.

REED, J. Good stands, earliness, high yields demonstrate the value of vigor. **Cotton Farming**, “não pag.”, 2002. Disponível em: <http://www.cottonfarming.co/home/2002_AprCF-Lead.html>. Acesso em: 23 set. 2003.

REETZ JR., H. F.; FIXEN, P. E. Strategic approach to site-specific systems. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 28, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

REW, L. J. et al. Evaluating airborne multiespectral imagery for detecting wild oats in a seedling triticale crop. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1999, Odense, Denmark. **Proceedings...** Sheffield: Society of Chemical Industry, 1999. v. 1, p. 265-74.

ROBERTSON, W. C.; WEATHERFORD, B. Evaluation of PGRs using Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. “não pag.”.

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos do solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 150 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

ROONEY, D.; STELFORD, M.; LANDOLT, D. Site-specific soil compaction mapping using a digital penetrometer. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 34, p. 1-4, 2001. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 23 set. 2003.

SALVADOR, A. **Comparação de métodos de mapeamento da distribuição espacial da infestação de plantas daninhas**. 2002. 109 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SALVADOR, A. **Silsoe Research Institute: agricultura de precisão**. 1999. 47 p. Relatório de estágio curricular (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

SAS INSTITUTE INC. **SAS procedures guide**. Version 6, Third Edition. Cary: SAS Institute Inc., 1990. 705 p.

SCHLEMMER, M.; HATFIELD, J.; RUNDQUIST, D. C. Remote sensing: photographic vs. non-photographic systems. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 16, p. 1-4, 1999. Disponível em: <<http://ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: 10 abr. 2000.

SEAL, M. R. et al. Utilization of remote sensing technologies in the development and implementation of large-scale spatially-variable insecticide experiments in cotton. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2001, Anaheim. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2001. p. 1010-8.

SHARP, T. C. Benefits of crop monitoring systems for evaluating cotton plant growth regulators. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 557.

SHARP, T. C. **Precision Agriculture: applied cotton management**. Jackson: Jackson State Community College, 2003. 86 p. (Material do Curso de Agricultura de Precisão)

SHARP, T. C. **Remote sensing: radiation and spectral signature**. Jackson: Jackson State Community College, 2002. 167 p. (Material do Curso de Sensoriamento Remoto)

SHIRATSUCHI, L. S. **Mapeamento da variabilidade espacial das plantas daninhas com a utilização de ferramentas da agricultura de precisão**. 2001. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SITES, J. et al. Whole farm evaluation of the Bollman component of Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 1136.

SST DEVELOPMENT GROUP INC. **SSToolbox user guide**. Version 3.3. Stillwater: Site Specific Technology Development Group Inc., 2001. 474 p.

STAFFORD, J. V. Applications and limitations of the global positioning system for precision agriculture in beet and potato crops. **Aspects Appl. Biol.**, v. 52, p. 79-86, 1998.

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **J. Agric.Eng.Res.**, v. 76, n. 3, p. 267-75, 2000.

STAFFORD, J. V. Introduction. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2, 1999, Odense, Denmark. **Proceedings...** Sheffield: Society of Chemical Industry, 1999. v. 1, p. 'v'.

STAFFORD, J. V. Precision agriculture: sensing, positioning and application machinery requirements. **Danish Inst. Plant Soil Science**, v. 1, n. 26, p. 10-20, 1995.

STAFFORD, J. V. Precision arable agriculture: sensing and control requirements. **Measurement Control**, v. 26, p. 202-5, 1993.

STAFFORD, J. V.; BENLLOCH, J. V. Machine-assisted detection of weeds and weed patches. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick, UK. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. v. 2, p. 511-8.

STAFFORD, J. V.; LE BARS, J. M.; AMBLER, B. A hand-held data logger with integral GPS for producing weed maps by field walking. **Comput. Electron. Agric.**, v. 14, p. 235-47, 1996.

STEWART, A. M. et al. Comparison of Cotman(TM) system with extension recommendations in North Carolina. In: BELTWISE COTTON CONFERENCE, 2000, San Antonio. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2000. p. 640-1.

SUDBRINK JR., D. L. et al. Site specific management in Mississippi Delta cotton: Experimental field studies and on-farm application. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2002, Atlanta. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2002. 6 p.

TEAGUE, T. G. et al. Methods for assessing the impact of irrigation on cotton crop development and boll shed. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 534-5.

THOMASSON, J. A. et al. Multitemporal remote sensing for predicting cotton yield. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 604-24.

THORNTON, P. K. et al. Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control. **Crop Prot.**, v. 9, p. 337-42, 1990.

TIAN, L.; REID, J. F.; HUMMEL, J. W. Development of a precision sprayer for site-specific weed management. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 42, p. 893-900, 1999.

TUGWELL, N. P. et al. A square abscission-node growth balance ratio for early-season decisions about cotton plant grow, square shed, plant growth regulators and utility of Cotman. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2000, San Antonio. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 2000. p. 695.

TUGWELL, N. P. et al. **Cotman sampling and data collection.** Cotman Expert System 5.0 Handbook. Fayetteville: University of Arkansas. 1998. p. 7-12.

TUGWELL, N. P. et al. Scoutmap: Cotman monitoring technique for boll shed and insect damage. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1999, Orlando. **Proceedings...** Memphis: National Cotton Council, 1999. p. 1230.

VETTORAZZI, C. A.; ANGULO FILHO, R.; COUTO, H. T. Z. Sistema de posicionamento global – GPS. **Eng. Rural**, v. 5, n. 2, p. 61-70, 1994.

VILLARROEL, D. et al. Evaluation of remote sensing capabilities in weed detection and mapping in cotton. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 2003, Nashville.

Proceedings... Memphis: National Cotton Council, 2003. p. 1545-8.

YANG, C.; BRADFORD, J. M.; WIEGAND, C. L. Airborne multispectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum and corn. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 44, p. 1983-94, 2001.

YANG, C. et al. Mapping grain sorghum growth and yield variations using airborne multispectral digital imagery. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 43, p. 1927-38, 2000.