



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16597-TDI/1583

ANÁLISE POR VETOR DE MUDANÇAS PARA AVALIAÇÃO MULTITEMPORAL E MULTISSENSORES DA COBERTURA DAS TERRAS DO CERRADO

Silvia Cristina de Jesus

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. José Carlos Neves Epiphanyo, aprovada em 27 de agosto de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/10.21.10.27>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16597-TDI/1583

ANÁLISE POR VETOR DE MUDANÇAS PARA AVALIAÇÃO MULTITEMPORAL E MULTISSENSORES DA COBERTURA DAS TERRAS DO CERRADO

Silvia Cristina de Jesus

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. José Carlos Neves Epiphanyo, aprovada em 27 de agosto de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/10.21.10.27>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Jesus, Silvia Cristina de.
J49An Análise por vetor de mudanças para avaliação multitemporal e
multissensores da cobertura das terras do Cerrado / Silvia Cristina
de Jesus. – São José dos Campos : INPE, 2009.
97 p. ; (INPE-16597-TDI/1583)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
Orientador : Dr. José Carlos Neves Epiphânio.

1. Análise por vetor de mudanças. 2. Detecção de mudanças.
3. Cerrado. 4. Multissensores. 5. Análise multitemporal. I. Título.

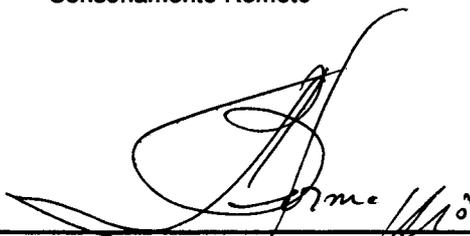
CDU 528.8.04

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

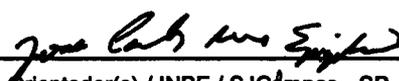
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Antonio Roberto Formaggio



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Diógenes Salas Alves



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Mário Valério Filho



Convidado(a) / UNIVAP / SJCampos - SP

Aluno (a): Silvia Cristina de Jesus

São José dos Campos, 27 de agosto de 2009

“Estudar a natureza equivale a uma prece.”
(Leonardo Da Vinci)

“A natureza criou o tapete sem fim que recobre a
superfície da terra. Dentro da
pelagem desse tapete vivem todos
os animais, respeitosamente.
Nenhum o estraga, nenhum rói,
exceto o homem.”
(Monteiro Lobato)

“This is Planet Earth. You’re looking at Planet Earth.”
(Duran Duran)

À minha família dedico.

AGRADECIMENTOS

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa.

Ao Dr. José Epiphanyo pela amizade, orientação, paciência e confiança.

Aos amigos Marta Eichenberger Ummus e Adalberto Koiti Miura pela motivação, compreensão e força.

Principalmente, agradeço a Deus, pois Ele tem abençoado todos os dias da minha vida.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a evolução temporal (33 anos) de expansão agrícola usando a técnica de Análise por Componentes Principais (ACP) para a geração de componentes de brilho e verdor, aplicada a dados de múltiplos sensores com distintas características espectrais e de resolução espacial. A partir dessas componentes, a Análise por Vetores de Mudanças (AVM) pode, então, fornecer informações sobre a intensidade e o tipo de mudança ocorrida. Utilizaram-se imagens orbitais MSS/Landsat, TM/Landsat e CCD/CBERS, adquiridas entre 1975 e 2008. O coeficiente Kappa variou de 0,18 a 0,41, indicando que a Análise por Vetores de Mudanças exibe concordância fraca ou regular em relação à interpretação visual. Considerando um nível de significância de $p=0,05$, verificou-se que o resultado da AVM é superior a uma classificação aleatória. De modo geral, os erros se devem a confusões espectrais associadas à cobertura do solo natural ou antrópica, tal como campo sujo e pasto, além de incrementos na biomassa vegetal, que podem se referir à regeneração florestal ou desenvolvimento de culturas agrícolas. A AVM mostrou-se útil na detecção de mudanças no sentido de permitir o uso de múltiplos parâmetros e a análise de suas variações ao longo do tempo. Como dados de entrada, as Componentes Principais mostraram-se meios diretos e rápidos para a geração de informações de brilho e verdor de uma determinada cena. As componentes principais foram viáveis na análise da variação desses parâmetros.

CHANGE VECTOR ANALYSIS FOR MULTITEMPORAL AND MULTISENSOR ASSESSMENT OF CERRADO LAND COVER

ABSTRACT

The main objective was to study the multitemporal expansion of agriculture for 33 years using three different satellites/sensors, by applying Principal Components Analysis techniques in order to generate the components of brightness and greenness for each dataset. The use of these components for the Change Vector Analysis can thus provide information on the intensity and type of change occurred. We used MSS/Landsat, TM/Landsat and CCD/CBERS, acquired between 1975 and 2008. The Kappa coefficients ranged from 0.18 to 0.41, indicating that the change of Vector Analysis had slight or fair agreement with visual analysis. Assuming a significance level of 0.05, it was verified that the result of analysis by Changes Vectors Analysis is better than a random classification. In general, the errors are due to spectral confusion associated with natural or anthropogenic land use, such as “campo limpo” and grazing, and increases in plant biomass, which may refer to forest regeneration or development of agricultural crops. Change Vector Analysis was useful for detecting changes and it accepts the use of different parameters, and considers its variation over time. As input data, the principal components are direct and rapid means for generating information of brightness and greenness of a particular scene. The principal components are feasible in studies involving the analysis of the variation of these parameters.

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
Figura 2.1	Fitofisionomias do Bioma Cerrado	5
Figura 2.2	Evolução do plantio de soja no Brasil	9
Figura 2.3	Resolução espectral dos sensores Landsat/MSS, Landsat/TM e CBERS/CCD	12
Figura 2.4	Transformação das componentes principais	18
Figura 2.5	Combinações de bandas para a Análise por Componentes Principais	21
Figura 2.6	Vetor de mudanças em um espaço de atributos.....	25
Figura 3.1	Localização da área de estudo no Estado de Goiás.....	30
Figura 3.2	Ciclo agrícola da soja e milho para o Estado de Goiás e datas de aquisição das cenas.....	34
Figura 3.3	Fluxograma do roteiro metodológico utilizado no processamento das imagens.....	35
Figura 3.4	Direção dos vetores e respectivas classes de mudanças	42
Figura 4.1	Aplicação da Análise por Componentes Principais	48
Figura 4.2	Localização dos pontos amostrais utilizados como dados de referência	50
Figura 4.3	Transição entre diferentes coberturas da terra	53
Figura 4.4	Definição dos limiares de mudança	56
Figura 4.5	Imagens de magnitude e direção de mudanças ocorridas entre 1991 e 1995	58
Figura 4.6	Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1975 a 1979 (a) e 1979 a 1985 (b)	
Figura 4.7	Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1985 a 1991 (a) e 1991 a 1995 (b)	59

Figura 4.8	Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1995 a 2000 (a) e 2000 a 2005 (b)	60
Figura 4.9	Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 2005 a 2008	61
Figura 4.10	Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1975 a 1985 (a) e 1985 a 2008 (b)	62
Figura 4.11	Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1975 a 1979	71
Figura 4.12	Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1979 a 1985	71
Figura 4.13	Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1985 a 1991.....	72
Figura 4.14	Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 2000 a 2005	72
Figura 4.15	Precipitação acumulada mensal no Estado de Goiás para os meses de aquisição das cenas	73
Figura 4.16	Mudanças de uso do solo no Município de Chapadão do Céu (1975-2008)	77

LISTA DE TABELAS

		<u>Pág.</u>
Tabela 2.1	Principais usos do solo no bioma Cerrado	8
Tabela 3.1	Principais produtores de soja do Estado de Goiás em 2006	31
Tabela 3.2	Principais culturas temporárias de Chapadão do Céu - GO	32
Tabela 3.3	Características principais das imagens utilizadas	33
Tabela 3.4	Coeficientes de calibração para os sensores MSS, TM e CCD	37
Tabela 3.5	Possíveis classes de mudanças de acordo com a variação de brilho e verdor	42
Tabela 3.6	Classificação da acurácia	45
Tabela 4.1	Valores de nível de cinza na primeira e na segunda componente principal.....	47
Tabela 4.2	Tabela de Validação com a informação binária de mudança	52
Tabela 4.3	Erros de omissão e comissão a partir da adoção de limiar igual a um desvio padrão	53
Tabela 4.4	Erros de omissão e comissão a partir da adoção de limiar igual a $\frac{1}{2}$ desvio padrão	54
Tabela 4.5	Atribuição de classes de intensidade de mudança, de acordo com o valor da magnitude	55
Tabela 4.6	Direção dos vetores de mudanças e respectivas classes	56
Tabela 4.7	Tabela de Validação de tipo de mudanças	64
Tabela 4.8	Matriz de confusão para os períodos considerados	65
Tabela 4.9	Classificação da acurácia da AVM para os períodos considerados	69
Tabela 4.10	Situações de ambiguidade na identificação de mudanças	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 O avanço da fronteira agrícola no bioma Cerrado	5
2.2 Sensoriamento Remoto como instrumento na detecção de mudanças da cobertura da terra	10
2.2.1 Implicações da combinação de dados multissensores.....	10
2.2.2 Detecção de mudanças e análise multitemporal de dados orbitais.....	14
2.2.3 Análise por Componentes Principais (ACP) na detecção de mudanças .	16
2.2.4 Análise por Vetores de Mudanças (AVM).....	24
2.2.5 Definição de limiares de mudanças.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Área de Estudo	29
3.2. Aquisição e pré- processamento dos dados	32
3.3 Detecção de alterações na cobertura do solo no período de 1975 a 2008	38
3.3.1 Análise por Componentes Principais.....	38
3.3.2 Análise por Vetores de Mudanças.....	40
3.3.3 Definição de limiares e classes de mudança.....	42
3.3.4 Validação.....	43
3.3.5 Alterações no uso do solo em Chapadão do Céu (GO) no período de 1975 a 2008.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 Geração das imagens de brilho e verdor	47
4.2 Análise por Vetores de Mudanças (AVM).....	49
4.3 Magnitude das mudanças.....	50
4.4 Caracterização das mudanças	56
4.5 Análise de exatidão	65
4.6 Alterações no Município de Chapadão do Céu	77

5. CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
 APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DAS IMAGENS DE RADIÂNCIA E REFLECTÂNCIA APARENTE.....	91
 APÊNDICE B - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DA MAGNITUDE DOS VETORES DE MUDANÇA	93
 APÊNDICE C - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DA DIREÇÃO DOS VETORES DE MUDANÇA	95
 APÊNDICE D - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CRUZAMENTO DE PLANOS DE INFORMAÇÃO (MAPA TEMÁTICO DE CLASSES DE MUDANÇAS E IMAGEM DE MAGNITUDE DE MUDANÇAS).....	97

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro já foi considerado impróprio para a agricultura, mas em cerca de três décadas transformou-se em uma das regiões com maior produtividade média do mundo. A redução das áreas de Cerrado pode ser atribuída principalmente à crescente demanda de novas áreas para agricultura. As características de topografia plana e as condições climáticas adequadas enquadram este bioma como uma região com condições para o desenvolvimento de culturas anuais.

É bem conhecida a mudança na aptidão agrícola dos solos de Cerrado no Brasil, que consistiu no desenvolvimento de tecnologias que resolvessem questões de baixa fertilidade e acidez do solo. Tal melhoria da aptidão agrícola deve-se também ao desenvolvimento de novas variedades de grãos, notadamente de soja, ao aprimoramento genético e a outros resultados de pesquisas agrícolas que tornaram mais rentável a utilização das terras de Cerrado.

A conversão de áreas para as atividades agropecuárias é assinalada como o principal agente de desmatamento em todo o mundo (HOUGHTON, 1994). A extensão da área de pastos e cultivos no Cerrado é maior do que na Amazônia, com implicações sérias, porém pouco compreendidas para o fluxo de nutrientes e da estabilidade naquele ecossistema. Por apresentar uma economia tradicionalmente voltada para a pecuária extensiva, seu quadro natural está sendo modificado com a introdução da agricultura mecanizada. Diferentemente da Amazônia, onde, após o abatimento da floresta, há um período de uso do solo pela pecuária, o Cerrado pode ser utilizado pela agricultura em menos de um ano após o desmate (NEPSTAD, 1997; MANTOVANI e PEREIRA, 1998).

Como resultado do aumento no consumo da soja a partir da década de 1960, houve uma elevação dos preços, o que estimulou a agricultura brasileira a

incentivar o cultivo mecanizado dessa cultura. Foi por meio de inúmeros incentivos que a região do Cerrado começou a produzir em alta escala a monocultura da soja (EMBRAPA SOJA, 2008).

A relevância das investigações a respeito das alterações do bioma Cerrado se deve à necessidade de avaliar o histórico da paisagem e sua situação atual, de modo que seja possível prever cenários vindouros e fornecer diretrizes para o zoneamento ecológico-econômico e para o planejamento de áreas protegidas. Deste modo, podem ser introduzidos critérios para definir quais áreas devem ser suprimidas ou mantidas, visto que muitos fragmentos do bioma podem não possuir mais valor ecológico e manter populações mínimas viáveis, em função de sua extensão ou nível de preservação (JESUS e MIURA, 2009).

A rápida conversão das paisagens naturais para espaços destinados à agricultura pode ser monitorada por técnicas de sensoriamento remoto, mais especificamente por métodos de detecção de mudanças a partir de dados multitemporais. O sensoriamento remoto orbital tem sido utilizado como uma importante ferramenta para o monitoramento dos recursos naturais, pois possibilita a aquisição de dados de grandes extensões geográficas. As técnicas de detecção automática de mudanças constituem ferramentas importantes para o acompanhamento das alterações ocorridas na paisagem ao longo do tempo, em particular aquelas de origem antrópica. Estas técnicas são baseadas na variação de valores físicos ou índices de vegetação em pixels correspondentes de imagens de datas diversas. Estudos de detecção de mudanças através do sensoriamento remoto são baseados no fato de que distúrbios, tanto naturais quanto de origem antrópica, no meio ambiente produzem variações detectáveis na resposta espectral do alvo ou do fenômeno estudado (SINGH, 1989).

A aquisição de dados de um mesmo sensor com fins de análise multitemporal torna-se por vezes complicada, principalmente em regiões tropicais úmidas,

devido à cobertura de nuvens. Para um diagnóstico de detecção de mudanças que englobe um longo período de tempo, dados provenientes de sensores diferentes são indispensáveis, visto que os dados de um único sensor podem não estar disponíveis. Por exemplo, dados anteriores a 1982 estão disponíveis apenas para o sensor MSS, dados SPOT de alta resolução espacial após 1986, e ETM+ a partir de 1999 (LU et al., 2004; JENSEN, 2005).

O objetivo deste trabalho é analisar o avanço da agricultura em uma região típica de Cerrado por meio de um estudo multitemporal de imagens orbitais. A premissa deste trabalho é que a Análise por Componentes Principais minimize a consequência do cruzamento de dados com resoluções espectrais diferentes, e que é possível utilizá-la para gerar as componentes de brilho e verdor para qualquer conjunto de imagens de sensores de resolução moderada. A partir dessas componentes, a Análise por Vetores de Mudanças pode, então, fornecer informações sobre a intensidade e o tipo de mudança ocorrida.

Os principais tópicos de análise são:

- Avaliar a efetividade da adoção de dados multissensores em análises multitemporais;
- analisar a eficácia da Análise por Vetores de Mudanças na detecção de alterações de cobertura da terra no Município de Chapadão do Céu (GO);
- avaliar o desempenho da Análise por Componentes Principais como fonte de dados para a Análise por Vetores de Mudanças; e
- analisar o incremento da agricultura no Município de Chapadão do Céu (GO), no período de 1975 a 2008.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O avanço da fronteira agrícola no bioma Cerrado

O Cerrado possui uma área original de 1,5 a 2,0 milhões de km², compreendendo um território principal localizado no Planalto Central Brasileiro, além de fragmentos que se estendem do extremo norte do país até a região sudeste e imediações do Pantanal. O termo “Cerrado” compreende um gradiente de fitofisionomias, de formações campestres (campo limpo, a arbustivas), cerradão, e as composições intermediárias (campo sujo, campo Cerrado e Cerrado *strictu sensu*) (Figura 2.1). A presença dessas fitofisionomias depende de propriedades do solo, tais como profundidade, fertilidade, capacidade de drenagem e ocorrência de subsolo firme, topografia suave, e queimadas – naturais ou não, bem como de interferências antrópicas (COUTINHO, 1978; FURLEY, 1999). Devido à sua variedade florística, é considerado um hotspot de biodiversidade global ameaçado pela conversão de uso da terra (MYERS et al., 2000; CAVALCANTI e JOLY, 2002).

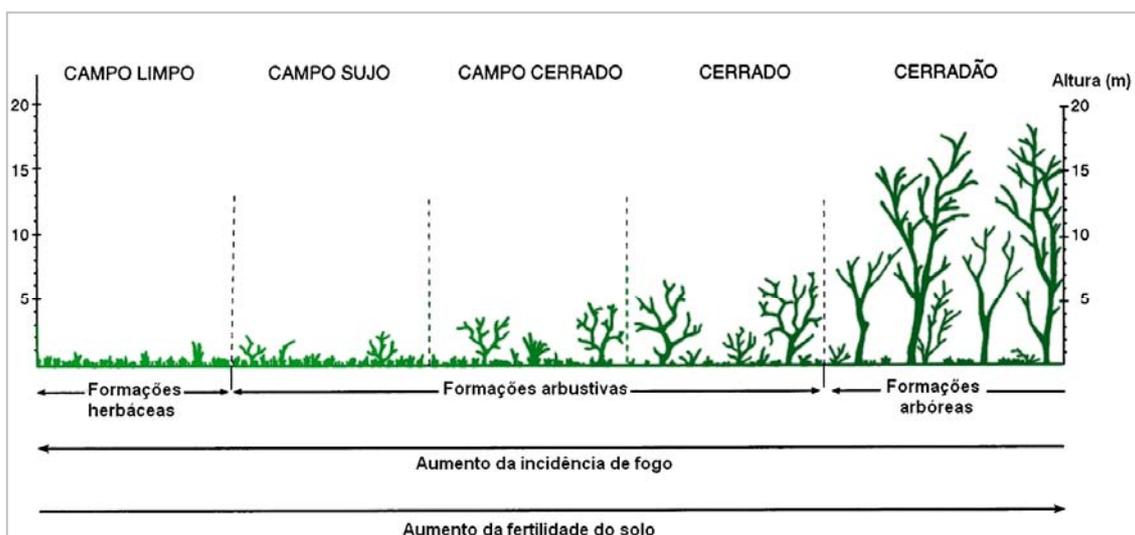


Figura 2.1 - Fitofisionomias do Bioma Cerrado.
Fonte: Adaptado de Furley (1999).

O Cerrado passou por um avanço significativo no setor agrícola. Embora haja controvérsias sobre a situação atual do estágio de conservação desse bioma e isto se deve a questões metodológicas das bases adotadas como referência para os mapeamentos. As principais fontes têm sido o mapa de cobertura vegetal para a América do Sul, produzido a partir de imagens SPOT Vegetation (1 km, 1999/2000), pela Comissão Européia (Joint Research Centre), os mapas gerados pela Conservation International, com base em dados do sensor MODIS (1 km), e o projeto PROBIO / Cerrado, baseado em imagens Landsat / TM (30 m, 2006). Os resultados obtidos foram, respectivamente, 53%, 55% e 39% de áreas convertidas para atividades agrícolas (FERREIRA et al., 2007).

Em 1999, estimava-se que apenas 20% da área original mantinham-se preservados (MITTERMEIER et al., 2000). Dias (1990) compilou resultados de fontes anteriores a 1985, que mostraram que naquela época, apenas 7% das paisagens naturais de Cerrado eram protegidas por lei, comparadas aos 37% de paisagens completamente antropizadas e 56% com algum tipo de produção economicamente importante, incluindo as atividades de pastagem e criação de gado que utilizam pouca tecnologia. Machado et al. (2004) indicam que as taxas de desmatamento têm variado entre 22.000 e 30.000 km² por ano (aproximadamente 1,5%), superiores às da Amazônia, o que se deve em parte pelo que é determinado no Código Florestal, que determina que apenas 20% da área das propriedades agrícolas sejam destinadas à reserva legal, enquanto nas áreas de floresta da Amazônia, esse percentual é de 80%. No Estado de Goiás, em particular, a conversão da cobertura nativa é da ordem de 64% e é marcada pela expansão da pecuária e avanços nas melhorias de técnicas agrícolas.

A detecção e o monitoramento de mudanças do bioma Cerrado têm sido comprometidos por alguns entraves, tais como a acentuada sazonalidade das principais fitofisionomias, o rápido avanço das atividades agrícolas,

necessidade de muitas imagens de resolução espacial média / alta para a cobertura de toda a área, longo período de ocorrência de nuvens, e as complicações na distinção das fitofisionomias do Cerrado. Neste último caso, a confusão espectral entre algumas classes de Cerrado e de uso da terra, tais como campo limpo / campo sujo e pastagem, que constitui um obstáculo na identificação de desmatamentos. Embora as pastagens cultivadas e as pastagens nativas sejam utilizadas para a criação de gado, as pastagens nativas são incluídas no grupo de remanescentes de Cerrado (SANO et al., 2005; FERREIRA et al., 2007).

Em decorrência do aprimoramento das técnicas de plantio, a agricultura em áreas do Cerrado brasileiro passou por profundas transformações nos últimos 40 anos, sendo que a soja é a cultura anual de maior expressão econômica do Brasil. Estima-se que 70% da área do Cerrado seja potencialmente apta para a agricultura. A área ocupada com agricultura saltou de 5 milhões de hectares em 1970 para 11 milhões em 1990. Nesse mesmo período, a produção de grãos aumentou de 6 para 20 milhões de toneladas e a produtividade foi de 1,2 t/ha para 1,9 t/ha. Utilizando tecnologia já existente seria possível alcançar uma produtividade de 3,2 t/ha. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja produzindo cerca de 20% da soja mundial. Apresenta importância estratégica não apenas no suprimento da demanda mundial de óleos vegetais, mas também, na oferta de proteínas para a produção de carnes a preços competitivos. Atualmente, é semeada em todas as regiões brasileiras (RESENDE e BAHIA FILHO, 1996; DALL'AGNOL et al., 2007).

Klink e Machado (2005) apontam que cerca de metade dos dois milhões de quilômetros quadrados do Cerrado foram convertidos em pastagens plantadas, agricultura, áreas urbanas e outros tipos de uso (Tabela 2.1). As monoculturas, principalmente a soja e as pastagens plantadas ocupam, respectivamente, 100.000 e 500.000 km² do bioma.

Tabela 2.1 – Principais usos do solo no bioma Cerrado.

Uso do solo	Área (ha)	% área do bioma
Áreas nativas	70.581.162	44,53
Pastagens plantadas	65.874.145	41,56
Agricultura	17.984.719	11,35
Florestas plantadas	116.760	0,07
Áreas urbanas	3.006.830	1,90
Outros	930.304	0,59
Total	158.493.921	

Fonte: Klink e Machado (2005).

Conforme Dall’Agnol et al. (2007), a soja foi a cultura que mais cresceu em termos de produção percentual nos últimos 37 anos, tanto no Brasil quanto em âmbito mundial, no contexto das grandes culturas de grãos. De 1970 a 2007, o crescimento da produção global foi da ordem de 763% (de 44 para 236 milhões de toneladas), enquanto outras culturas cresceram, no máximo, uma terça parte desse montante. No contexto mundial, o Brasil figura como o segundo produtor, com indicações evidentes de que será o primeiro ainda durante esta década, dadas as limitações de área para expansão nos demais países produtores e pelo domínio tecnológico que o Brasil possui para produzir em regiões tropicais com baixas latitudes. Considerando todos os estados brasileiros, a área cultivada com soja foi a que teve crescimento mais expressivo (1,3 milhões de ha, em 1970, para 20,7 milhões de ha, em 2007, representando 45% da área plantada com culturas anuais no país, conforme Figura 2.2).

O aumento da produção de soja brasileira ao longo das últimas décadas implica em mudanças sócio-econômicas e ambientais significativas. Iniciado na região sul do país, o cultivo de soja espalhou-se gradativamente em direção ao norte, nas grandes savanas centrais do Brasil, e atualmente, está presente até mesmo no extremo norte da Bacia Amazônica (BROWN et al., 2005).

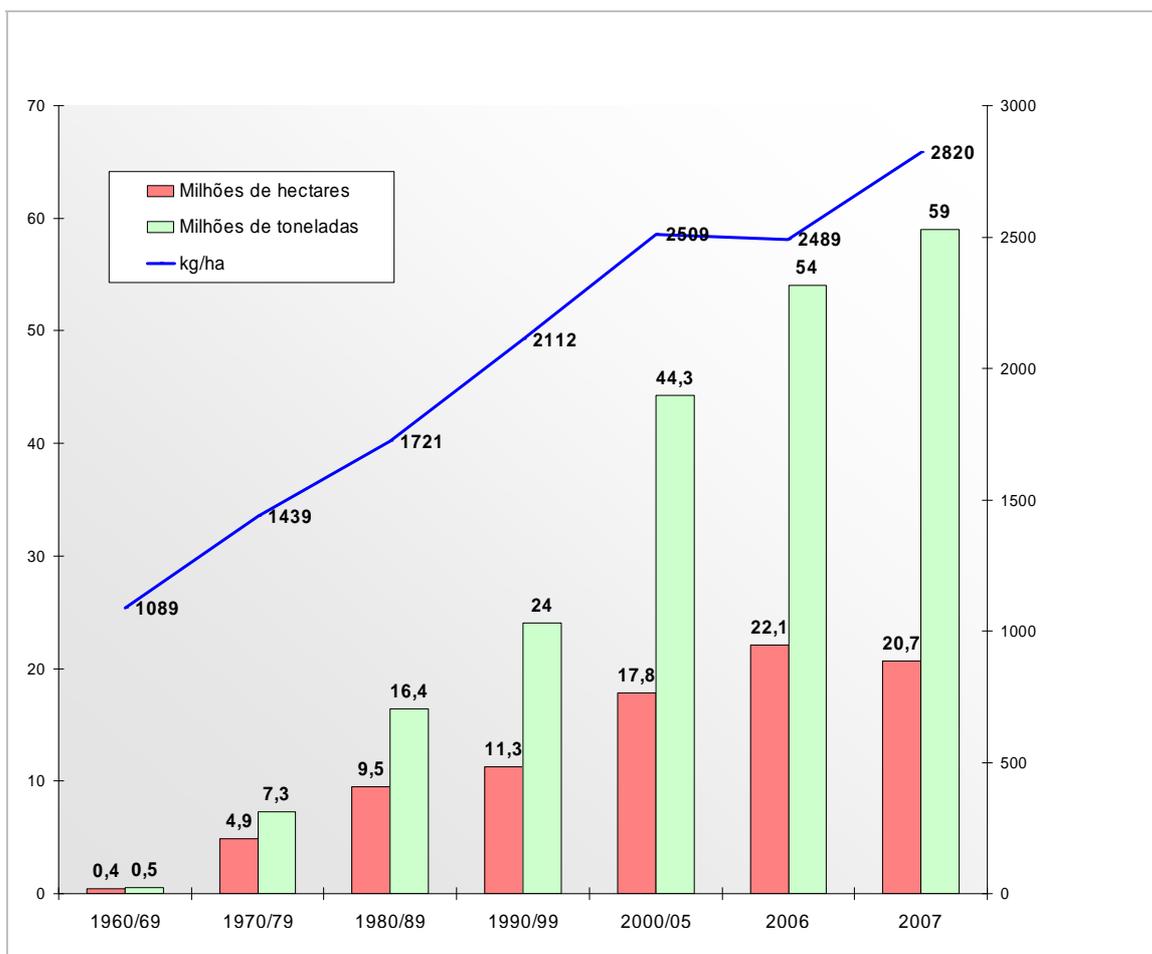


Figura 2.2 - Evolução do plantio de soja no Brasil.
 Fonte: Adaptada de Dall’Agnol et al. (2007).

O Estado de Goiás é o que apresenta a maior cobertura do bioma Cerrado, mas apenas 35% de sua área total mantêm-se ainda em sua constituição nativa (SANO et al., 2006). A conversão da cobertura original em pastagens cultivadas a partir da década de 1970 e o desenvolvimento de técnicas que propiciaram a implantação de atividades agrícolas nas décadas de 1980 e 1990 permitiram a expansão de áreas produtoras de grãos, algumas com altos índices de produtividade, com destaque para a sojicultura (MESQUITA et al., 2007).

Dois fatores principais foram responsáveis pela ocupação moderna no Cerrado: a) a construção de Brasília no final dos anos 50, e b) a adoção de políticas de desenvolvimento e investimentos na infraestrutura entre os anos de 1968 e 1980. A construção de rodovias permitiu a ocupação do espaço e a expansão da agricultura comercial no Cerrado. As políticas com maior impacto na expansão agrícola foram o crédito subsidiado, isenção de impostos nas atividades agrícolas, e o desenvolvimento de tecnologias agro-sustentáveis para modificar as condições climáticas e de solo da região. Os subsídios favoreceram as lavouras comerciais nas despesas com matéria prima e adaptações do ambiente. Desde que a concessão de empréstimos tornou-se disponível na mesma proporção que as áreas de cultivo, houve um forte impacto na natureza do desenvolvimento e na evolução das áreas desmatadas. Por toda a região, houve uma forte tendência à urbanização e ao declínio da população rural (NEPSTAD et al., 1997). A exploração da soja em Goiás se deu em função dos programas federais de incentivo agrícola que proporcionaram ao Estado um novo modelo de produção agrícola. A criação do programa de desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) em 1975 impulsionou a expansão da sojicultura e teve como meta a modernização das atividades agropecuárias da região Centro-Oeste, o que resultaria na importante participação da soja no PIB de Goiás (VIEIRA, 2002).

2.2 Sensoriamento Remoto como instrumento na detecção de mudanças da cobertura da terra

2.2.1 Implicações da combinação de dados multissensores

Dada sua extensão, acentuada sazonalidade das suas fitofisionomias, o rápido avanço das atividades agrícolas e a confusão espectral entre algumas classes de uso antrópico e de vegetação natural, o monitoramento da ocupação dos solos do Cerrado é um dos mais difíceis de serem realizados (SANO e FERREIRA, 2005).

A identificação e a estimativa de áreas de diferentes fitofisionomias por meio de imagens de resolução moderada (MSS, TM, ETM+) têm sido bem sucedidas em locais onde a cobertura da terra é uniforme e homogênea. No entanto, regiões em que a paisagem é heterogênea, em particular na transição entre diferentes classes de uso do solo, a acurácia da classificação pode ser comprometida. Isto implica que a utilidade dos dados multiespectrais para determinadas aplicações pode estar sujeita aos limites da resolução espacial destes dados (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

A inclusão de dados MSS torna-se necessária nas análises multitemporais que consideram períodos anteriores a 1984, quando foi lançado o sensor TM a bordo do Landsat 4. Entretanto, a combinação de dados multissensores exige procedimentos de pré-processamento de modo que seja possível associar informações derivadas de resoluções espacial, espectral e radiométrica distintas.

A desvantagem do uso dos dados multissensores para detecção de mudanças é a dificuldade no processamento de imagens e a seleção de técnicas apropriadas (LU et al., 2004). Diferenças na resolução espacial podem ser solucionadas pela reamostragem do tamanho dos pixels, ou ainda pela restauração da imagem. Desigualdades causadas por variações no ângulo de elevação solar e variações sazonais oriundas de dados adquiridos em épocas diferentes podem ser corrigidas por técnicas de correção atmosférica e, caso necessário, pela normalização de imagens.

A localização e a largura das bandas do sensor TM permitem uma melhor discriminação espectral das principais características da superfície em relação ao sensor MSS. Segundo Lillesand e Kiefer (1999), as bandas do TM são mais apropriadas para a discriminação da vegetação em relação às das do MSS

por várias razões. As bandas do verde e do vermelho do sensor TM (bandas 2 e 3) são mais estreitas do que suas correspondentes no MSS (Figura 2.3). Além disso, a banda do infravermelho próximo do TM é mais estreita do que as bandas combinadas do MSS nesta região do espectro e está centrada em uma região de máxima sensibilidade ao vigor da vegetação. Muitos dos algoritmos de detecção de mudanças não funcionam plenamente quando as bandas de um sensor não correspondem às bandas do outro (JENSEN, 2005).

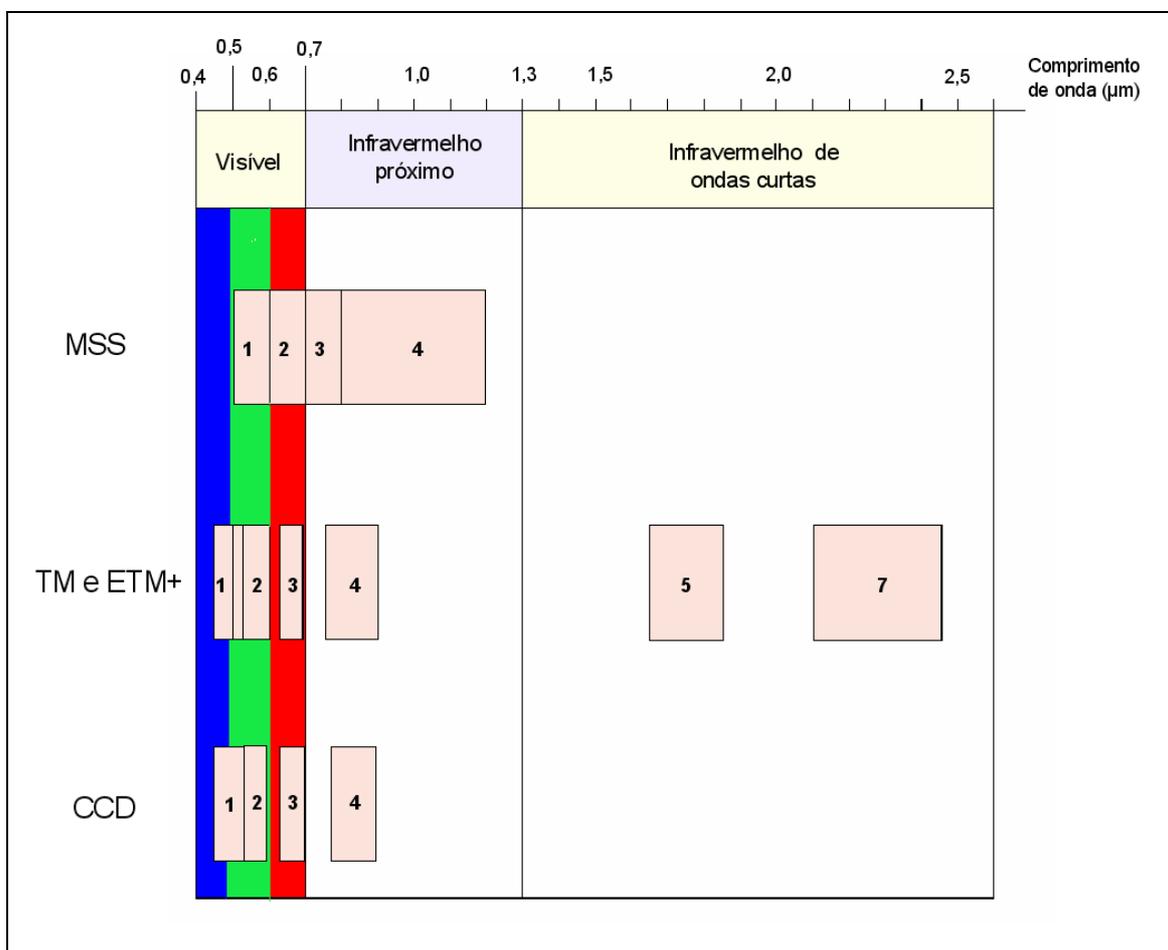


Figura 2.3 - Resolução espectral dos sensores Landsat/MSS, Landsat/TM e CBERS/CCD.

Com relação à resolução radiométrica, o sensor TM converte os sinais para valores digitais em 8 bits (quantização em 256 níveis de cinza), o que

corresponde ao aumento em quatro vezes o limite da escala de cinza do MSS (6 bits). Tal precisão radiométrica permite observar alterações mais sutis em uma dada banda, e fornece maior sensibilidade em relação às variações entre bandas. A utilização de sistemas sensores diferentes em métodos de detecção digital de mudanças pode implicar em resultados imprecisos. A conversão dos valores de brilho para reflectância de superfície minimiza este problema.

A resolução espacial de 30 m do sensor TM representa uma diminuição de aproximadamente 2,6 vezes no tamanho do pixel observado (JENSEN, 2005; LILLESAND e KIEFFER, 1999). Nestas condições, os fragmentos de Cerrado ou áreas agrícolas que tenham mais de 0,09 hectares podem ser identificados pelo sensor TM, ao passo que o MSS reconhece apenas os alvos que tenham pelo menos 0,64 hectares. As implicações dessas variações dependem da escala temporal considerada, ou seja, da rapidez em que as alterações na paisagem ocorrem. Este problema poderia ser contornado pela reamostragem do tamanho do pixel. Entretanto, este procedimento altera os valores dos números digitais dos pixels.

Ao lidar com imagens multitemporais, é necessário que as cenas obtidas em diferentes épocas sejam compatíveis em termos de características radiométricas. Isto não ocorre, mesmo que os dados sejam adquiridos pelo mesmo sensor, por razões como alterações no desempenho do sensor ao longo do tempo, variações nas condições de iluminação solar, espalhamento e absorção pela atmosfera, e mudanças nas condições atmosféricas. Deste modo, caso o objetivo seja analisar quantitativamente as diferenças temporais com base nas informações espectrais, os conjuntos de dados devem ser ajustados de modo que as divergências atmosféricas sejam compensadas. Os métodos mais comuns de normalização implicam em operações com a mesma banda espectral de imagens multitemporais. No caso da normalização de dados multissensores, há implicações adicionais provenientes das diferenças

na largura das bandas espectrais. Apesar da alta correlação entre as bandas dos sensores MSS, TM e CCD, os limites de banda não são diretamente coincidentes, o que implica em dificuldades na padronização de imagens MSS a partir de dados TM, e vice-versa (CALLAHAN, 2003).

2.2.2 Detecção de mudanças e análise multitemporal de dados orbitais

As séries temporais de dados de sensoriamento remoto são importantes fontes de informação para a compreensão da dinâmica do uso e cobertura da terra. A detecção de alterações na cobertura da terra temporais pode ser útil na indicação de áreas degradadas, clareiras em comunidades florestais, atividades de exploração madeireira, desmatamento, queimada para manutenção e conversão, e implantação de pastagens e culturas (SILVA, 2004).

Detecção de mudanças refere-se ao processo que auxilia a determinação de alterações associadas ao uso e cobertura do solo, com referência a dados de sensoriamento remoto multitemporais corrigidos (DIALLO et al., 2009). A premissa básica do uso dos dados de sensoriamento remoto para a detecção de mudanças é que as alterações na cobertura da terra resultarão em variações nos valores de reflectância, que são diferentes de mudanças provocadas por outros fatores como diferenças nas condições atmosféricas, iluminação, ângulos de visada, umidade do solo, calibração do sensor, e procedimentos de processamento das imagens isto é, condições que tendem a se alterar com o tempo (MAS, 1999).

Há diversos métodos para a detecção de mudanças a partir de dados orbitais multitemporais. Uma avaliação desses métodos mostra que os resultados diferem de acordo com o método utilizado, mesmo que as análises tenham sido feitas em uma mesma área de estudo (SINGH, 1989). Lu et al. (2004)

compararam diferentes algoritmos de detecção de mudanças, apresentando suas vantagens e aplicações. Os métodos foram agrupados em sete categorias: 1) álgebra; 2) transformação; 3) classificação; 4) modelos avançados; 5) sistemas de informações geográficas; 6) análise visual; e 7) outros enfoques.

Jensen (2005) elenca outros algoritmos de detecção de mudanças: 1) Função de inserção na memória (write function memory - WFM); 2) composição de um arquivo único a partir de imagens de várias datas; 3) álgebra de imagens; 4) comparação pós-classificação; 5) aplicação de máscara binária; 6) análise do vetor de mudança espectral; 7) correlação cruzada; 8) digitalização visual; e 9) sistemas de interpretação baseados em conhecimento prévio.

Cakir et al. (2006) organizaram as técnicas de detecção de mudanças em 1) algoritmos pré-classificação e 2) algoritmos pós-classificação. Os algoritmos pré-classificação envolvem a análise de imagens transformadas de duas datas diferentes. Esta imagem transformada é o produto de diversas operações especializadas, incluindo subtração de imagens, Análise por Componentes Principais, índice de vegetação por diferença normalizada, entre outras. As imagens convertidas contêm informações espectrais sobre as mudanças que ocorreram no período considerado, o que requer procedimentos de processamento de imagens complementares para gerar mapas temáticos de mudanças de cobertura da terra. Os métodos pós-classificação envolvem classificações temáticas independentes das imagens multitemporais. Os mapas temáticos são então comparados e analisados com a finalidade de mapear os tipos de mudanças ocorridas (DARYAIE, 2003; YUAN et al., 2005).

Em geral, os algoritmos de detecção de mudanças são classificados em dois tipos: 1) métodos que detectam apenas a informação binária, ou seja, se

ocorreu mudança ou não, tais como a Análise por Componentes Principais, diferença de índices de vegetação e subtração de imagens; e 2) métodos que qualificam as mudanças e identificam o tipo de mudança que ocorreu, como a análise por vetor de mudanças e a comparação pós-classificação.

Um dos métodos de pré-classificação de detecção de mudanças envolve a Análise por Componentes Principais – ACP (principal components analysis – PCA), também chamada transformação de Karhunen-Loeve. A técnica ACP consiste na transformação dos dados originais das imagens e geração de um conjunto menor de informações. A transformação consiste na rotação dos dados no espaço espectral, de modo que as informações são representadas em um novo sistema de coordenadas espectrais e algumas feições são realçadas. Este procedimento será apresentado em detalhes a seguir.

2.2.3 Análise por Componentes Principais (ACP) na detecção de mudanças

Os dados de longas séries temporais têm sido amplamente utilizados na caracterização da cobertura da terra. Um enfoque da distinção de tipos de cobertura da terra a partir de dados multitemporais é a Análise por Componentes Principais (ACP). A ACP tem sido empregada com sucesso em sensoriamento remoto para a transformação de dados da imagem, compressão de informações, e análise de detecção de mudanças. Esta técnica estatística de dados multivariados tem mostrado ser efetiva quando aplicada em dados de séries temporais longas ou curtas para identificar alterações na superfície.

O objetivo principal da Análise por Componentes Principais é a obtenção de um pequeno número de combinações lineares (componentes principais) de um conjunto de variáveis, que retenham o máximo da informação contida nas variáveis originais. A utilização da ACP explora a baixa correlação das bandas

de imagens multitemporais de regiões que mudam substancialmente (RICHARDS, 1993) e, portanto, pode subsidiar estudos sobre mudanças relacionadas à cobertura do solo.

A Análise por Componentes Principais é uma transformação linear de variáveis correlacionadas em variáveis não-correlacionadas, sem que haja alteração do número de variáveis (bandas espectrais). Dado que as variáveis transformadas (componentes principais - CP's) tornam-se não-correlacionadas, elas podem ser consideradas independentes. As variáveis transformadas são ordenadas em termos de variância. Deste modo, a primeira CP representa a maior parte da variação dentro do conjunto de dados, e a informação multitemporal presente neste conjunto é refletida pela variância. Assim, pelo menos uma parte da variância do conjunto de dados das imagens multitemporais pode ser usada para caracterizar a cobertura da terra. A Figura 2.4 mostra a distribuição dos níveis de cinza em bandas espectrais (canal X e canal Y). A nuvem de pontos formada caracteriza uma elipse que traduz a elevada correlação entre as duas bandas. Os eixos X e Y são girados na direção da maior variação dos dados.

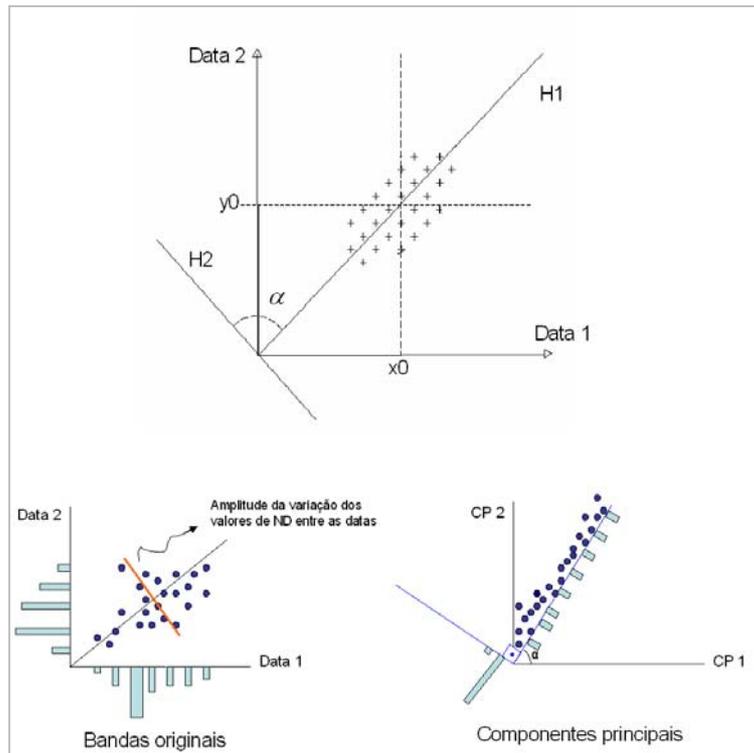


Figura 2.4 - Transformação das componentes principais.
 Fonte: Adaptado de Centeno (2004).

A variância dos níveis de cinza nas duas bandas pode ser medida pela variância de cada banda. A variação dos dados ao longo dos eixos coordenados é menor que ao longo do eixo principal da elipse, isto é, a discriminação dos dados torna-se mais fácil projetando os dados ao longo do eixo principal da elipse, dado na Figura 2.4 por H1.

Os coeficientes da rotação são obtidos pela análise da matriz de covariância do conjunto de observações mediante o cálculo de seus autovetores. Os autovalores da matriz de variância-covariância são calculados e, a partir de sua equação característica, são associados a autovetores que definem uma direção no espaço das observações como uma combinação linear dos dados originais. Este novo conjunto de eixos é constituído pelas componentes principais da matriz original, visto que eles são paralelos aos eixos de maior

variação. A relação entre os autovalores indica a importância de cada componente e seu respectivo teor de informação. A variância original explicada por cada componente pode ser calculada como a relação entre o autovalor e a soma de todos os autovalores (CENTENO, 2004).

A ACP é uma transformação de coordenadas pela rotação de eixos, gerando componentes que são somas ponderadas das bandas originais, assim como o *tasseled cap*, que gera os índices “*brightness*” (brilho) e “*greenness*” (verdor) relacionados, respectivamente, à variação espectral dos solos e ao vigor da vegetação (KAUTH e THOMAS, 1976; CRIST e CICONE, 1984). Ingebritsen e Lyon (1985) geraram componentes principais a partir de dois conjuntos de imagens multitemporais, e constataram que as variâncias comuns às duas datas poderiam ser expressas pelas duas componentes principais, que representam o brilho e o vigor da vegetação. Singh e Harrison (1985) defendem que a segunda componente principal traduz o contraste dos canais do visível em relação ao infravermelho médio, ou seja, as regiões do espectro onde há maior resposta da vegetação.

Entretanto, os coeficientes de ponderação da transformação *tasseled cap* são específicos para a região e data dos estudos originais de Kauth e Thomas (1976) e Crist e Cicone (1984), e são gerados por meio de ortogonalizações sucessivas dos eixos. Na Análise por Componentes Principais, os coeficientes são oriundos de relações estatísticas entre as bandas, que podem variar de um conjunto de imagens para outro, assim como a distribuição estatística dos pixels em um dado canal espectral (GLERIANI et al., 2003). Outro paralelo que pode ser traçado em relação ao *tasseled cap* e a ACP é que os índices de brilho gerados por Kauth e Thomas são fundamentados somente na linha de solo, enquanto a componente de brilho da ACP é uma medida mais generalizada (INGEBRITSEN e LYON, 1985).

Deste modo, assume-se que a Análise por Componentes Principais pode ser empregada na análise multitemporal da dinâmica da paisagem, gerando imagens *brightness* e *greenness* a partir da primeira e da segunda componentes principais. As componentes resultantes de diferentes sensores podem ser combinadas, pois a princípio, têm o mesmo significado, ou seja, referem-se ao brilho e ao vigor da vegetação. Deste modo, a execução da ACP individual para cada data considerada permite que dados multitemporais oriundos de sensores com características diferentes sejam combinados. Outras técnicas de detecção de mudanças não permitem essa combinação, senão a comparação pós-classificação, o NDVI e a imagem de regressão.

A escolha da CP depende da contribuição de cada banda para cada CP, que pode variar em cada cena. Assim, a primeira componente principal corresponde aos valores de brilho, e a segunda componente principal pode corresponder ao verdor, caso as faixas correspondentes ao vermelho e infravermelho médio sejam as que mais contribuam para a geração desta componente. Componentes de maior ordem são constituídas pelas informações que há em comum entre as bandas originais e, portanto, as demais componentes dão informação das mudanças ocorridas entre as diferentes datas.

Usualmente, há duas formas de aplicar a ACP para a detecção de mudanças. No primeiro caso, assume-se que as bandas originais representam informações espectrais similares. As bandas de imagens multitemporais são agrupadas em um único arquivo, e a ACP é executada, de modo que seja possível analisar as componentes que fornecem as informações não redundantes. As componentes que representam mudanças mostram ausência de correlação entre as bandas das diferentes datas. O outro modo consiste em execuções distintas da ACP para cada data, para então subtrair as informações

de albedo (primeira componente) da data mais recente da mais antiga (Figura 2.5).

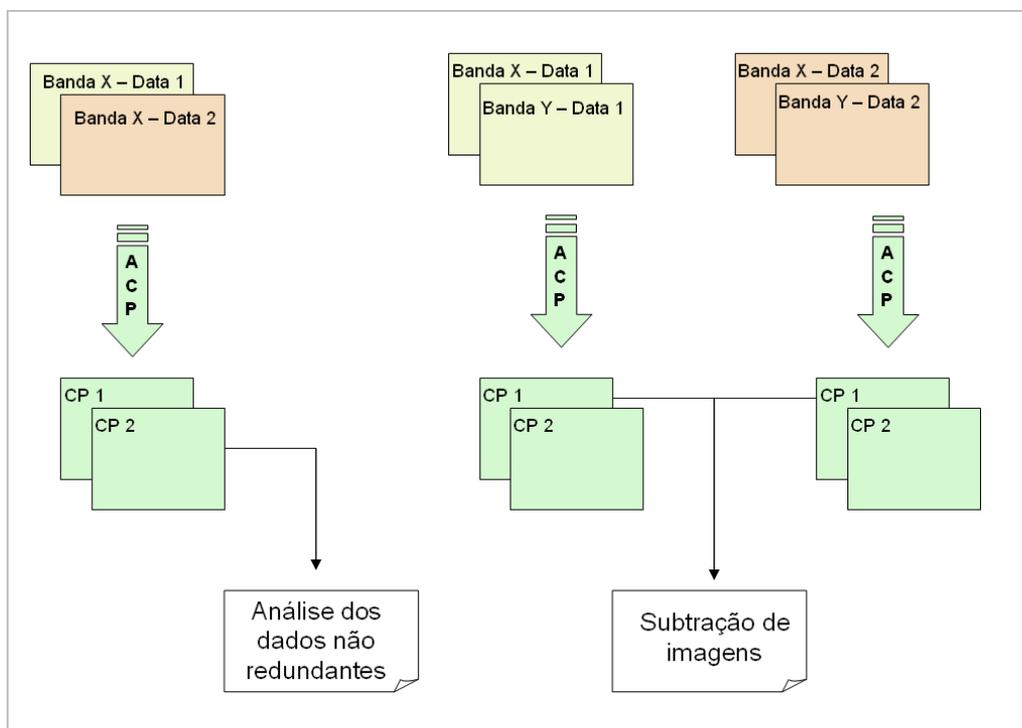


Figura 2.5 - Combinações de bandas para a Análise por Componentes Principais

Mas (1991) comparou diversas técnicas de detecção de mudanças, incluindo a Análise por Componentes Principais. Apenas as bandas MSS2 (vermelho) e MSS4 (infravermelho próximo) das imagens multitemporais foram empregadas, a partir das quais a informação comum a ambas foi mapeada na segunda componente. Como resultado, a ACP apresentou maior acurácia em relação ao método de subtração de imagens. O autor defende que a ACP removeu a variabilidade entre as cenas provocadas pelas condições atmosféricas e variações no desempenho do sensor, que permanecem após a normalização radiométrica.

Nikolakopoulos et al. (2007) afirmam que a seleção da componente que fornece as informações de mudança depende da proporção mudança / não mudança, que varia em cada cena. Assim, a escolha da CP depende da

contribuição de cada banda para cada CP, que varia em cada cena. Assim, a primeira componente principal corresponde aos valores de brilho, e a segunda componente principal pode corresponder ao verdor, caso as faixas correspondentes ao vermelho e infravermelho médio sejam as que forneçam mais informações (Jensen, 2005). Para contornar essa questão, a Análise por Componentes Principais também pode ser usada pela composição colorida das três primeiras componentes principais (Nikolapoukos et al., 2007; Kaiser, 2009), gerando uma imagem de mudanças, ou ainda usando as componentes principais como base para uma classificação (Deng et al., 2009).

Byrne et al. (1980) aplicaram a ACP nas quatro bandas de imagens Landsat/MSS adquiridas em duas datas. Os dois conjuntos de quatro bandas foram combinados e considerados como um único conjunto de oito bandas. As terceira, quarta e quinta componentes apresentaram a maior parte da informação útil para a detecção de mudanças na cobertura do solo, enquanto a primeira CP forneceu informações sobre a topografia da área de estudo.

Eastman e Fulk (1993) utilizaram o NDVI para identificar as duas primeiras CP's como a representação do *greenness* acumulado durante o período de análise (primeira CP) e a variação sazonal (2ª CP). Estas CPs foram identificadas pela análise da estrutura dos autovetores. Neste caso, a primeira CP serviu como uma média da quantificação da densidade e atividade fotossintética da vegetação, enquanto a 2ª CP permitiu quantificar o padrão sazonal das mudanças na vegetação.

Hirosawa et al. (1996) investigaram a aplicação da ACP a partir do NDVI com o objetivo de caracterizar a cobertura da terra em escala global mediante dados orbitais multitemporais Advanced Very-High Resolution Radiometer (AVHRR),

e avaliaram a técnica do vetor vegetação para visualizar variações na cobertura da vegetação e características fenológicas de distintas coberturas do solo.

Piwowar e Millward (2002) abordaram as questões de classificação de componentes de três modos. A primeira abordagem, pode ser aplicada à imagem de cada ano, para condensar as informações multiespectrais independentes. Nas análises anuais, a primeira PC foi altamente correlacionada com as bandas do visível e a segunda PC destacou as características associadas ao canal do infravermelho próximo. As imagens anuais associadas à primeira CP foram utilizadas numa segunda Análise por Componentes Principais para realçar as características multitemporais evidentes nos dados espectrais do canal do visível e as imagens associadas à segunda PC foram usadas para isolar as mudanças temporais notáveis no canal do vermelho. A segunda técnica foi uma variação da primeira, na qual a primeira e segunda componentes de cada ano foram analisadas conjuntamente em uma ACP multitemporal. Na terceira abordagem, o NDVI foi calculado a partir das bandas do visível e do infravermelho próximo para cada data. As imagens NDVI foram empregadas em uma segunda ACP para realçar as mudanças ao longo do tempo.

Lasaponara (2006) discute o uso da ACP na avaliação de anomalias interanuais da vegetação em dados SPOT / VEGETATION. A ACP foi empregada para destacar regiões de mudança no período considerado, o que resultou em uma alta correlação entre as regiões que não foram alteradas e em uma correlação relativamente baixa associada às regiões significativamente alteradas. As áreas de vegetação natural e de atividade agrícola foram analisadas de modo que fosse possível extrair as alterações naturais e/ou antrópicas mais proeminentes.

A partir da geração das componentes principais, as mudanças são estabelecidas somente pela análise estatística do histograma, não sendo necessária a classificação da imagem. No entanto, este procedimento não informa a natureza da mudança ocorrida, mas identifica somente o aumento ou a redução da vegetação (JENSEN, 2005).

2.2.4 Análise por Vetores de Mudanças (AVM)

A Análise por Vetores de Mudanças é uma técnica que tem se mostrado eficiente na detecção de mudanças a partir de dados multissensores. Sua principal vantagem em relação a outras técnicas inclui a capacidade de processar e analisar simultaneamente várias bandas ou componentes espectrais (JOHNSON e KASISCHKE, 1998).

Um vetor de mudança espectral pode ser gerado a partir de dois ou mais conjuntos de canais originais adquiridos em épocas distintas, ou a partir de combinações lineares como as componentes geradas pelo *tasseled cap*, ou pela ACP. Os dados de entrada são abordados em um espaço de atributos, em que uma alteração é definida pelo deslocamento de um mesmo pixel de datas diferentes neste espaço de mudanças multiespectrais, sendo caracterizada por um vetor (SCHOPPMANN e TYLER, 1996). São gerados, então, dois produtos: 1) uma imagem de magnitude de mudanças; e 2) uma imagem de vetor de mudanças.

A magnitude do vetor de mudanças é determinada pela distância Euclidiana entre os pontos que representam a posição do pixel nesse espaço de atributos. Cada valor de magnitude traduz um vetor de mudança específico, o que permite estabelecer limiares de mudanças, de acordo com uma determinada escala (Figura 2.6). Assim, um limiar alto pode ser estabelecido para exibir somente mudanças mais acentuadas.

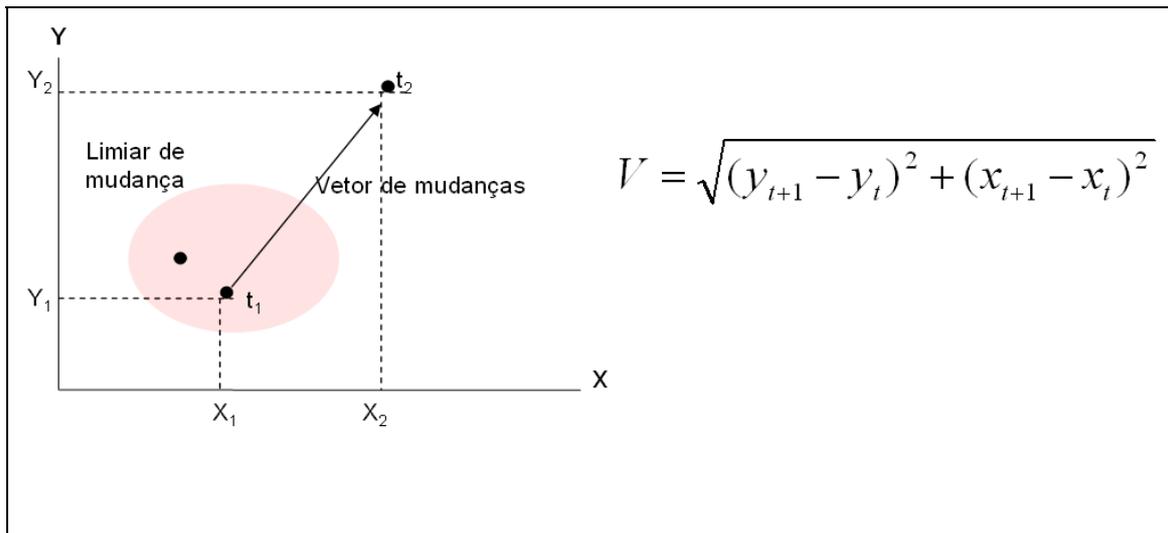


Figura 2.6 - Vetor de mudanças em um espaço de atributos.
 Fonte: Adaptado de Silva (2004).

A imagem de vetor de mudanças representa apenas a alteração que caracteriza cada direção de vetor como, por exemplo, aumento ou redução de biomassa vegetal, ao passo que a imagem de magnitude é caracterizada por apresentar as variações de cada classe de mudanças.

O ângulo dos vetores varia conforme o número de componentes utilizadas. A direção pode ser positiva ou negativa em cada canal. Como resultado, a AVM fornece a possibilidade de detectar 2^n tipos de mudança, onde n é o número de bandas ou componentes espectrais consideradas. Deste modo, um intérprete pode analisar mudanças com base nas relações espectrais, e não somente fazer inferências sobre as alterações que ocorreram durante um dado intervalo de tempo (JOHNSON, 1994; SCHOPPMANN e TYLER, 1996).

Michalek et al. (1993) usaram as três bandas do visível do sensor Landsat/TM como fonte de entrada para detectar mudanças na região costeira a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Lambin e Strahler (1994) aplicaram a AVM para três indicadores multitemporais de condições da superfície terrestre - NDVI, temperatura da superfície e estrutura espacial – oriundos do sensor

AVHRR. Constataram que a AVM é eficaz na detecção e caracterização de alterações na cobertura da terra, em diferentes escalas temporais.

Siwe e Koch (2008) implementaram a Análise por Vetores de Mudanças a partir de dados multitemporais TM e ETM+ para monitorar a dinâmica de florestas. A técnica foi empregada para comparar as diferenças ao longo do tempo das componentes *greenness* e *brightness* geradas pelo *tasseled cap*. Berberoglu e Akin (2009) compararam quatro métodos de detecção de mudanças, incluindo a AVM, que apresentou a melhor acurácia na identificação de alterações a partir das bandas 3 e 4 do Landsat/TM, apesar de demandar maior tempo de processamento.

2.2.5 Definição de limiares de mudanças

Os métodos de detecção de mudanças que são baseados em álgebra de imagens, como a subtração, ou em transformações, como a Análise por Componentes Principais, requerem a seleção de limiares que distingue áreas de mudança e de não-mudança. Esses limites podem ser selecionados por procedimentos de tentativa e erro, ou a partir de parâmetros estatísticos da imagem. A definição rigorosa desses limites pode ignorar influências externas, como condição atmosférica, ângulo de elevação solar, umidade do solo e variações fenológicas que não se referem ao objetivo da avaliação (Lu et al., 2004).

Os algoritmos de detecção de mudanças baseados na definição de limiares de identificação de transformações na paisagem podem ter como fonte de erros a dificuldade de distinguir pixels realmente alterados de pixels identificados como área de mudança. Por exemplo, em territórios de atividades agrícolas, essas técnicas frequentemente resultam em erros, visto que as cenas podem ter sido adquiridas em épocas referentes a estágios fenológicos diferentes de uma

determinada cultura. As técnicas fundamentadas nos métodos de classificação podem evitar tais problemas, mas requerem maior tempo de processamento de imagens.

A classificação de pixels em regiões de mudança ou não mudança depende da definição de um limiar de valores de níveis de cinza no histograma da imagem. Eastman e Fulk (1993) obtiveram uma discriminação satisfatória das mudanças produzidas pela atividade pastoril em savanas, considerando o limiar de mudança como sendo um desvio padrão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O Município de Chapadão do Céu foi selecionado como área de estudo por constituir uma região cujo histórico de interferências antrópicas no uso do solo desponta na década de 1970, ou seja, as alterações da paisagem, principalmente no que se refere à conversão da vegetação nativa para áreas agrícolas, são contemporâneas aos primeiros dados do sensoriamento remoto orbital. Abrange uma área de preservação de remanescentes do Cerrado, como o Parque Nacional das Emas, além de fragmentos deste bioma, ao mesmo tempo em que é um dos Municípios com maior produção agrícola do Estado de Goiás.

O Município de Chapadão do Céu está situado no extremo sudoeste do Estado de Goiás, a 480 km de Goiânia (Figura 3.1). Apresenta 2355 km² de extensão, dos quais apenas dois quilômetros quadrados são urbanizados. A contagem da população para o ano de 2007 é de 5289 habitantes (IBGE, 2009). Está inserido na Bacia do Rio Corrente a uma altitude de 840 m, no domínio geomorfológico dos planaltos e chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná, no domínio do Grupo São Bento. O relevo é predominantemente plano, com declividades inferiores a 15%. As principais unidades pedológicas de uso agrícola são latossolo vermelho, textura argilosa e textura média com areias quartzozas (NASCIMENTO, 1992).

A paisagem nativa é caracterizada por extensas formações savânicas, entremeadas por matas ciliares, além de campos úmidos e veredas de buritis onde o lençol freático é superficial. Há grande variação entre formações arbustivas e herbáceas, formando um gradiente estrutural que vai do cerrado completamente aberto – o campo limpo, vegetação dominada por gramíneas, sem a presença dos elementos lenhosos – ao cerrado fechado,

fisionomicamente florestal – o cerrado, com grande quantidade de árvores e aspecto florestal. As formas intermediárias são o campo sujo, o campo cerrado e o cerrado *strictu sensu* (MOREIRA et al., 2005).

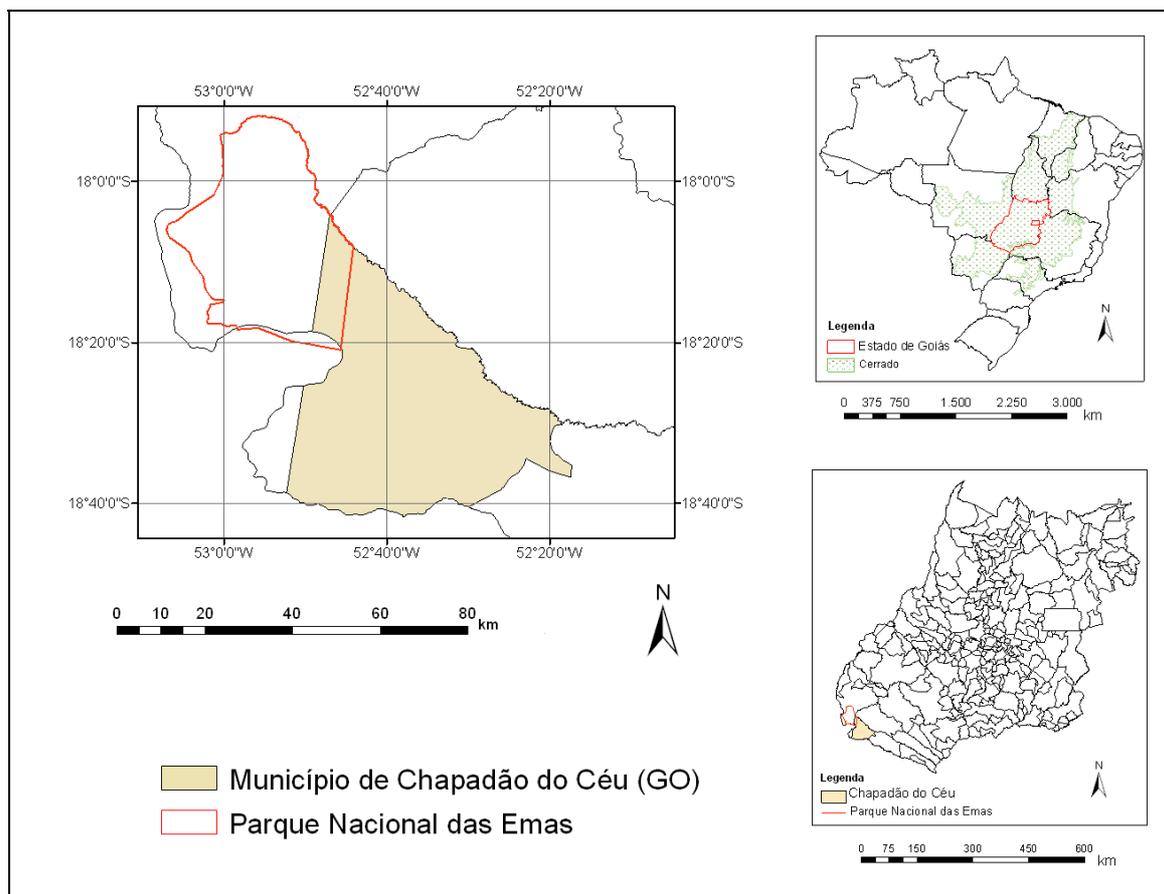


Figura 3.1 - Localização da área de estudo no Estado de Goiás.

Cerca de 32% do território é constituída de áreas protegidas, incluindo parte do Parque Nacional das Emas, as reservas legais (20% das propriedades rurais, conforme o Código Florestal Brasileiro de 1965) e as áreas de preservação permanente (margens de rios, córregos e nascentes). O índice pluviométrico médio anual é regular (aproximadamente 1200 mm /ano) e a distribuição das chuvas não é uniforme ao longo do ano, ocorrendo predominância de precipitações nos meses de novembro a março. É caracterizado segundo a

classificação de Köeppen como Aw – tropical chuvoso de savana com inverno seco (IBAMA, 2009).

A agricultura é a principal atividade econômica do município, sendo responsável por aproximadamente 70% do PIB local. A produção agrícola utiliza cerca de 58% do território. As principais culturas são soja e milho, que corresponderam a 78% da produção de grãos (Tabela 3.1), sendo que a cana de açúcar também tem sido cultivada com as perspectivas de aumento do mercado sucro-alcooleiro e produção de biodiesel (IBGE, 2009). Segundo o último Censo Agropecuário do IBGE, Chapadão do Céu é um dos principais produtores de grãos do Estado, ocupando o 6º lugar em produção e o 3º em proporção de área ocupada pela cultura de soja (Tabela 3.2).

Tabela 3.1 - Principais produtores de soja do Estado de Goiás em 2006.

	Município	Extensão territorial (km²)	Área cultivada (ha)	Quantidade produzida (ton)	Rendimento médio (ton/ha)	p¹
1	Montividiu	1875	89000	249200	2800	0,475
2	Bom Jesus de Goiás	1405	50000	125000	2500	0,356
3	Chapadão do Céu	2355	82396	247188	3000	0,350
4	Perolândia	1030	35000	102900	2940	0,340
5	Jataí	7174	202000	606000	3000	0,282
6	Rio Verde	8388	230000	579600	2520	0,274
7	Cristalina	6161	120000	288000	2400	0,195
8	Goiatuba	2475	48000	117600	2450	0,194
9	Catalão	3778	72000	180000	2500	0,191
10	Mineiros	8896	118000	339840	2880	0,133

Fonte: IBGE (2009).

¹ O valor p refere-se à razão entre a área cultivada e a extensão do Município.

Tabela 3.2 Principais culturas temporárias de Chapadão do Céu – GO.

	Área plantada (ha)	Valor da produção (Mil Reais)	Rendimento médio (kg/ha)	Quantidade produzida (ton)	Rendimento (Reais / ton)	p¹
Soja	82396	108763	3000	247188	440	0.350
Milho	46588	82708	7017	326909	250	0.198
Sorgo	40000	13312	1600	64000	210	0.170
Algodão	17969	67518	4499	80860	830	0.076
Girassol	8187	6327	1599	13099	480	0.035
Feijão	4320	6026	1500	6480	930	0.018
Total	273669	284654				

Fonte: IBGE (2009).

3.2. Aquisição e pré- processamento dos dados

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat, sensor MSS, TM e CCD adquiridas no período de 1975 a 2008, conforme a Tabela 3.3. As cenas foram adquiridas pela base de dados da Divisão de Geração de Imagens / INPE. Os critérios de seleção das cenas foram a cobertura de nuvens, época do ano em que a vegetação nativa apresenta-se mais vigorosa, calendário agrícola regional e proximidade sazonal. Para o processamento dos dados foram consideradas as bandas com zonas comuns no espectro eletromagnético (0,5 a 1,1 μm), ou seja, canais 1, 2, 3 e 4 do sensor MSS / Landsat, canais 2, 3 e 4 do sensor TM / Landsat, e canais 2, 3 e 4 da câmera CCD / CBERS 2.

Tabela 3.3 - Características principais das imagens utilizadas.

Sensor	Bandas	Resolução espacial	Órbita / ponto	Data de aquisição
MSS	1 (0,5 – 0,6 μm)	80 m	240/73	14/05/1975 02/05/1979
	2 (0,6 - 0,7 μm)			
	3 (0,7 - 0,8 μm)			
	4 (0,8 -1,1 μm)			
TM	1 (0,45 – 0,51 μm)	30 m	224/73	19/06/1985
	2 (0,52 – 0,61 μm)			19/05/1991
	3 (0,63 - 0,69 μm)			14/05/1995
	4 (0,76 - 0,90 μm)			27/05/2000
	5 (1,55 - 1,75 μm)			30/03/2008
	7 (2,08 – 2,35 μm)			
CCD	1 (0,45 – 0,52 μm)	20 m	161/121 162/121	11/05/2005 14/05/2005
	2 (0,52 – 0,59 μm)			
	3 (0,63 - 0,69 μm)			
	4 (0,77 - 0,89 μm)			

Na época da aquisição das imagens, as principais safras já haviam sido colhidas (Figura 3.2). As áreas que são dominadas por soja são aproveitadas para o plantio do milho safrinha. Entretanto, o objetivo desse trabalho é averiguar o incremento das áreas agrícolas como um todo, e não quantificar cada tipo de produção. Os procedimentos metodológicos são sumarizados na Figura 3.3.

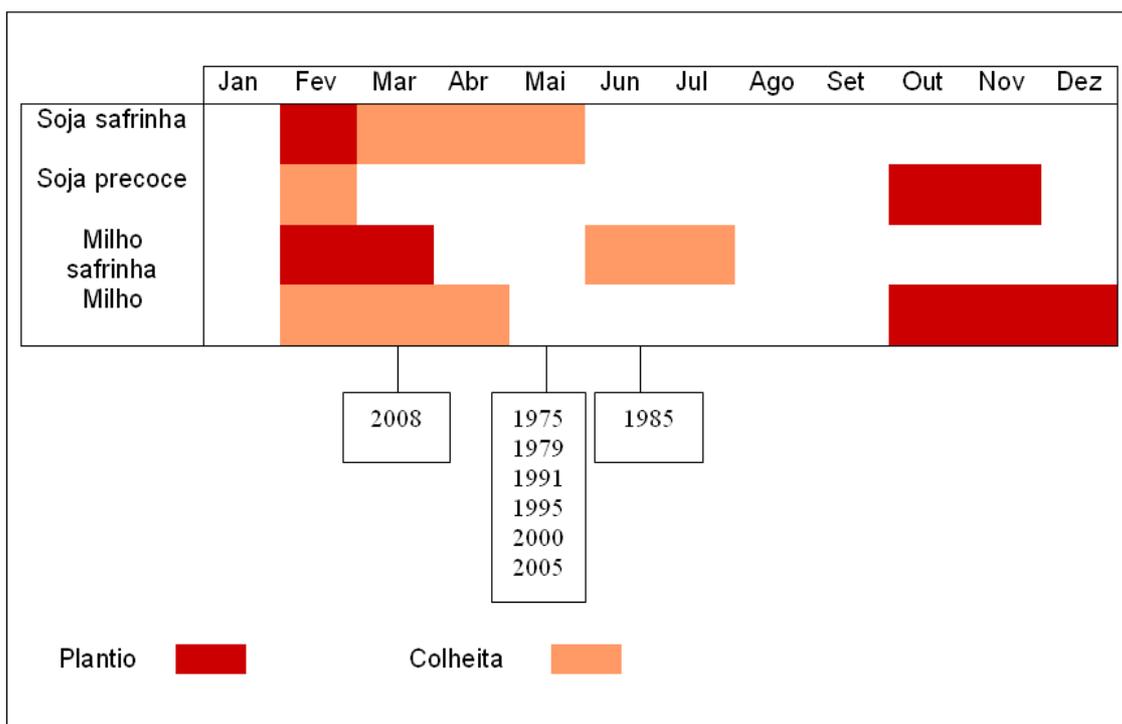


Figura 3.2 - Ciclo agrícola da soja e milho para o Estado de Goiás e datas de aquisição das cenas.

Fonte: CONAB (2008)

As bandas foram unificadas em um arquivo único para cada cena. Foi criado um banco de dados no sistema SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) v. 4.3.3 para realizar operações algébricas sobre as imagens em ambiente LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico). Neste programa, os níveis digitais foram convertidos para radiância aparente.

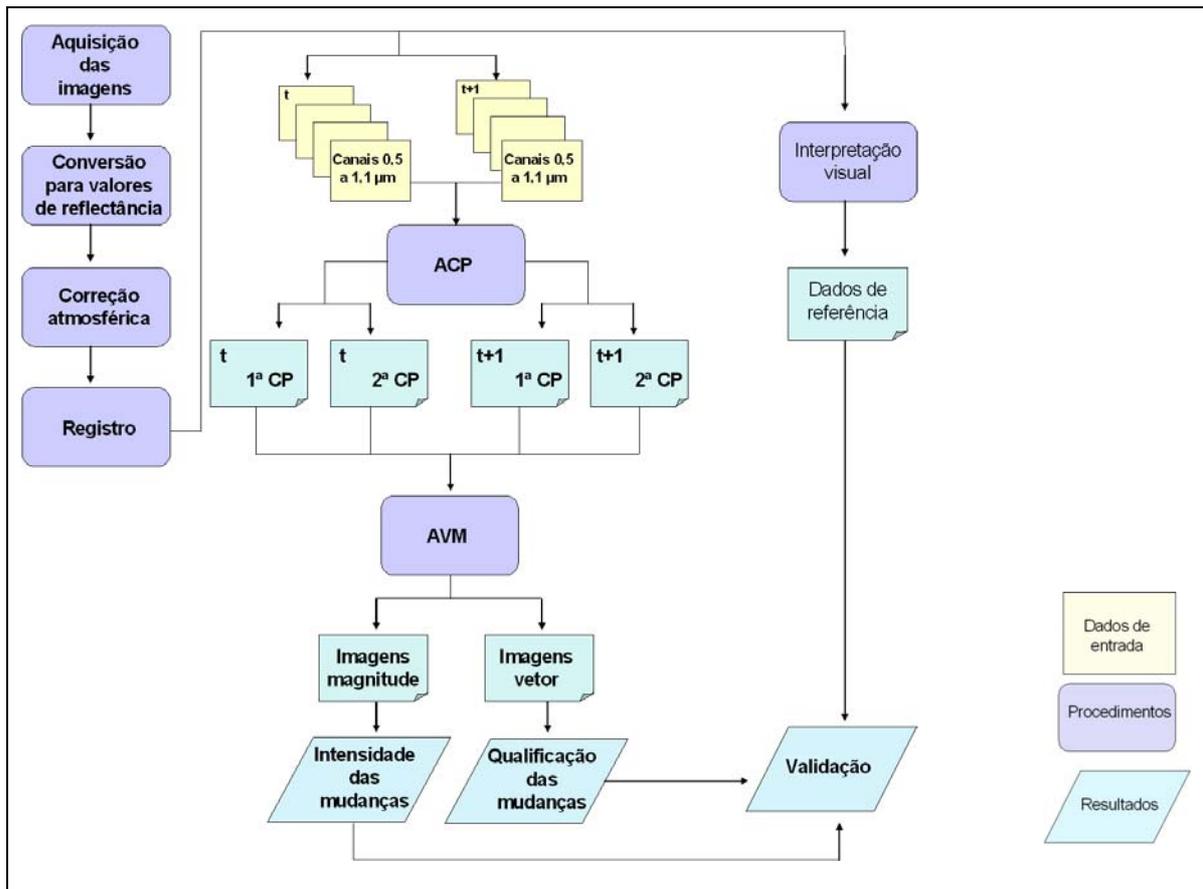


Figura 3.3 - Fluxograma do roteiro metodológico utilizado no processamento das imagens.

A calibração radiométrica dos sensores foi realizada pelo rescalonamento dos números digitais brutos transmitidos dos satélites para os dados digitais calibrados, que têm o mesmo limiar dinâmico de pós-calibração para todas as cenas processadas para um período de tempo específico. As constantes de calibração radiométrica usadas nessa transformação são modificadas após o lançamento do satélite, devido a eventuais inconsistências entre bandas, a mudanças no limiar de sensibilidade dos sensores, ou à necessidade de transformar os valores de radiância calibrados (QCAL), de modo que estejam compatíveis com os de outros sensores. A conversão dos valores de QCAL para radiância espectral (L_λ) é efetuada a partir dos limites inferior e superior do limiar de pós calibração para uma banda específica ($L_{MIN\lambda}$ e $L_{MAX\lambda}$) (MARKHAM e BARKER, 1986).

A conversão dos números digitais das imagens para valores físicos (ANEXO A) teve como objetivo permitir os cálculos entre imagens de diferentes sensores, dado que os sensores MSS e TM têm critérios de discretização de valores de radiância, que são medidos na escala específica de sua resolução radiométrica. Os valores de radiância - $L_{0(\lambda)}$ foram calculados com base nos parâmetros $L_{\min}(\lambda)$ e $L_{\max}(\lambda)$ que representam os valores de radiância mínima e de radiância máxima que são específicos para cada sensor. O valor de $L_{0(\lambda)}$ é dado por

$$L_0(\lambda) = L_{\min}(\lambda) + \frac{L_{\max}(\lambda) - L_{\min}(\lambda)}{2^x} \cdot ND(\lambda) \quad (3.1)$$

Onde x representa o número de bits que define a resolução radiométrica do sensor (TEILLET et al., 2001). A Tabela 3.4 fornece os valores dos parâmetros $L_{\min\lambda}$ e $L_{\max\lambda}$ usados em diferentes períodos para o processamento de dados MSS, TM e CCD.

Após a conversão para valores de radiância, a transformação para reflectância aparente foi efetuada através da equação 3.2.

$$\rho_{apar}(\lambda) = \frac{\pi \cdot L_0(\lambda) \cdot \left(\frac{d_m}{d}\right)^2}{E_{sol(\lambda)} \cdot \cos\theta_{zenital}} \quad (3.2)$$

Onde d e d_m representam a distância instantânea e a distância média Sol-Terra em unidades astronômicas; $E_{sol(\lambda)}$ é a irradiância solar média no topo da atmosfera ($W/m^2 \cdot \mu m$) e $\cos\theta_{zenital}$ representa o cosseno do ângulo zenital solar. A irradiância média no topo da atmosfera ($E_{sol(\lambda)}$) pode ser obtida conforme Chander e Markham (2003).

Tabela 3.4 - Coeficientes de calibração para os sensores MSS, TM e CCD.

Landsat 2: MSS (< 16 / jul / 1975) – mW / (cm² · sr · μm)		
Banda	L min	L max
MSS 1	1.0	21.0
MSS 2	0.7	15.6
MSS 3	0.7	14.0
MSS 4	0.5	13.8

Landsat 2: MSS (> 16 / jul / 1975) – mW / (cm² · sr · μm)		
Banda	L min	L max
MSS 1	0.8	26.3
MSS 2	0.6	17.6
MSS 3	0.6	15.2
MSS 4	0.4	13.0

Landsat 5: TM (< 4 / mai / 2003) – W / (m² · sr · μm)		
Banda	L min	L max
TM 1	-1.52	152.10
TM 2	-2.84	296.81
TM 3	-1.17	204.30
TM 4	-1.51	206.20
TM 5	-0.37	27.19
TM 7	-0.15	14.38

Landsat 5: TM (> 4 / mai / 2003) – W / (m² · sr · μm)		
Banda	L min	L max
TM 1	-1.52	193.0
TM 2	-2.84	365.0
TM 3	-1.17	264.0
TM 4	-1.51	221.0
TM 5	-0.37	30.2
TM 7	-0.15	16.5

CBERS 2: CCD – W / (m² · sr · μm)	
Banda	Cc
CCD 1	10,09
CCD 2	19,30
CCD 3	11,54
CCD 4	21,27

Fonte: MARKHAM e BARKER (1986); CHANDER e MARKHAN (2003); PONZONI et al. (2007).

A correção atmosférica foi realizada pelo método DOS - *Dark Object Subtract* (CHAVEZ, 1988). Embora essa técnica considere apenas o fenômeno do espalhamento da atmosfera (mais intenso nas bandas do visível), em detrimento do de absorção (bandas selecionadas para a composição das componentes principais), a escolha do método 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) implicaria na necessidade de caracterizar ou inferir a atmosfera no momento da aquisição das imagens (VERMOTE et al., 1997), o que poderia ter um efeito potencializado no caso da combinação de dados multitemporais.

As imagens foram registradas com o objetivo de minimizar os efeitos de distorção e adequá-las a um sistema geodésico de referência. Foi usada como referência a base de dados de imagens pré-registradas disponibilizadas pela NASA (GEOCOVER, 2008). Para o registro das imagens de 2008, 2005, 2000 e 1995 foi utilizado o mosaico Geocover de imagens TM/ Landsat adquiridas em 2000. Para as imagens de 1991 e 1985 foi utilizada a cena GLCF (Global Land Cover Facility) datada de 1989. As imagens de 1979 e 1975 foram registradas com base na cena GLCF de 1976. Foi empregado o algoritmo do vizinho mais próximo de modo que o erro quadrático médio (RMS) fosse inferior a um pixel. Os pixels da imagem MSS e CCD foram reamostrados para 30 metros de resolução, de modo que fosse possível o cruzamento das informações multissensores, e todas as cenas apresentam a projeção UTM, datum SAD69.

3.3 Detecção de alterações na cobertura do solo no período de 1975 a 2008

3.3.1 Análise por Componentes Principais

A Análise por Componentes Principais foi realizada separadamente para cada cena, considerando os canais que compreendem o intervalo de 0,5 a 1,1 μm .

Quando um cenário anual era composto de mais de uma cena, as principais componentes foram geradas individualmente, seguidas da mosaicagem. Os autovalores das componentes principais foram reescalados para valores de 0 a 255, de modo que todas as imagens apresentassem a mesma escala.

Foi considerada a matriz de correlação para a geração das componentes principais. Segundo Fung e LeDrew (1987), as componentes principais geradas a partir dos autovetores da matriz de correlação fornecem informações mais precisas para a detecção de mudanças, em relação à matriz de covariância. Em análises multitemporais a padronização minimiza as diferenças oriundas das condições atmosféricas e ângulos solares, quando os conjuntos de imagens multitemporais são agrupados para executar uma única ACP. A padronização significa que cada banda apresenta a mesma variância. Eastman e Fulk (1993) também sugerem que, ao analisar dados multitemporais, a ACP padronizada fornece resultados mais robustos em relação à ACP não padronizada. A padronização implica que cada banda tem a mesma importância para a formação das novas componentes.

A primeira e a segunda componente principal de cada conjunto de dados foram consideradas como as representações de brilho e vigor vegetativo, respectivamente. Essas componentes foram combinadas, definindo um novo sistema de coordenadas no espaço de atributos espectrais em que os parâmetros referem-se às propriedades de "*brightness*" e "*greenness*". A variação da posição de um mesmo pixel em tempos sucessivos no espaço de atributos é o que determina a direção e a magnitude dos vetores de mudanças espectral.

3.3.2 Análise por Vetores de Mudanças

A magnitude e a direção do vetor de mudança indicam respectivamente a intensidade e a natureza da mudança. Os cálculos da magnitude e da direção dos vetores foram realizados pixel a pixel para toda a imagem por programações em LEGAL (ANEXOS B e C). Foram tomados como dados de entrada a primeira e a segunda componente principal de cada par de datas (1975-1979, 1979-1985, 1985-1991, 1991-1995, 1995-2000, 2000-2005; 2005-2008, 1975-1991, 1991-2008). A magnitude dos vetores (V) foi determinada pelo cálculo da distância euclidiana entre a posição de um mesmo pixel de datas diferentes no espaço de atributos formado pela primeira e segunda componentes, segundo a Equação 3.3.

$$V = \sqrt{(CP1_{t-1} - CP1_t)^2 + (CP2_{t-1} - CP2_t)^2} \quad (3.3)$$

Este procedimento resultou em grades regulares com valores de 0 a 255. Foram calculados o desvio padrão e a média de cada uma das grades de magnitude e, a partir desses valores, foi estabelecido o limiar de mudanças.

Para gerar as informações de vetor de mudanças, foram aplicadas as equações 3.3 a 3.5 a partir da primeira e segunda componente de cada par de datas, conforme apresentado em Silva (2004):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t}\right) \quad \text{Para } (CP2_{t+1} - CP2_t) > 0 \quad (3.3)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t}\right) + 3,14288 \quad \text{Para } (CP1_{t+1} - CP1_t) > 0 \quad (3.4)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t}\right) - 3,14288 \quad \text{Para } (CP1_{t+1} - CP1_t) < 0 \quad (3.5)$$

A aplicação destas equações gerou grades com valores de $-\pi$ a $+\pi$. As direções resultantes foram fatiadas para a identificação das classes de mudanças em um mapa temático. Dado que foram utilizadas duas componentes de entrada para a determinação dos vetores de mudanças, obtiveram-se como resultado quatro classes (2^2 classes) de direção de mudanças (Tabela 3.5). Esta pode ser negativa ou positiva, caso os níveis de cinza aumentem ou diminuam de uma data para outra, e relaciona-se a um tipo de mudança, de acordo com o deslocamento no espaço de atributos que considera os valores de *brightness* e *greenness* (Figura 3.4).

As classes solo, cultura, regeneração e queimada / água foram definidas como classes de mudanças de cobertura da terra. As fitofisionomias campo sujo e campo limpo foram classificadas como **solo**, bem como as áreas de solo exposto, solo preparado e pousio, ainda que estas últimas caracterizem antropismos. Isto porque há dificuldade de distinguir o solo com certo grau de antropismo de formações arbustivas do Cerrado, visto que, embora a interpretação visual identifique certa cobertura da terra em função da textura e geometria do alvo, a resposta espectral destas classes é similar. As **culturas** agrícolas correspondem às áreas em que as plantações estão em pleno vigor vegetativo. As áreas de **regeneração** devem estar associadas aos espaços em que houve recuperação da área em virtude da sucessão da comunidade vegetal, ou ainda da restituição da área natural após um período de pousio. As **queimadas** correspondem às áreas em que há cicatrizes de queima, sejam

elas antrópicas ou naturais. Dada a similaridade das cicatrizes mais recentes com corpos d'água, estas foram incorporadas à mesma classe.

Tabela 3.5 - Possíveis classes de mudanças de acordo com a variação de brilho e verdor.

Classes	Parâmetros das imagens	
	Brilho	Verdor
Regeneração	-	+
Agricultura	+	+
Queimada e água	-	-
Desmatamento / solo exposto	+	-

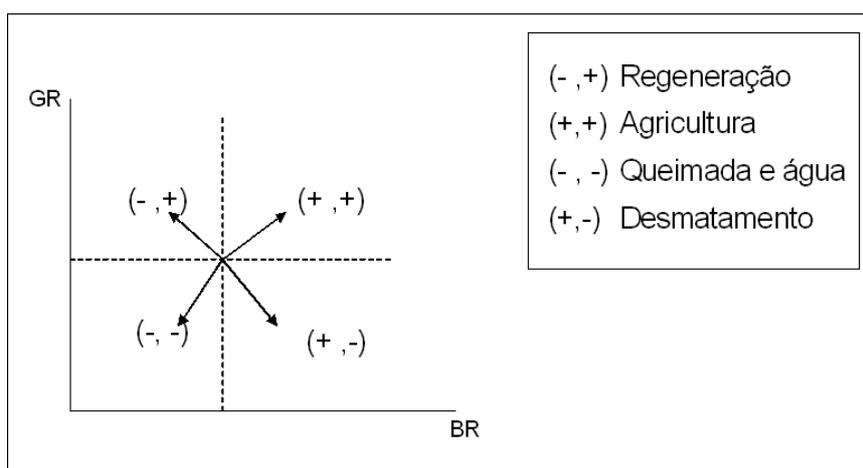


Figura 3.4 - Direção dos vetores e respectivas classes de mudanças.

3.3.3 Definição de limiares e classes de mudança

Os valores das imagens de magnitude foram reescalados para o intervalo de 0 a 255, de modo que fosse possível comparar os resultados de todos os intervalos considerados.

Para ajustar o valor do limiar de mudanças, foi criada uma Tabela de Validação com a informação binária de mudança. Esta tabela fornece informações sobre as classes de uso do solo em 100 pontos (pixels) selecionados aleatoriamente para todos os períodos (1975, 1979 1985, 1991, 1995, 2000, 2005 e 2008). Esses dados foram confrontados com a informação binária (mudança / não mudança) fornecida pelo limiar de mudança, considerado inicialmente como um desvio padrão (EASTMAN e FULK, 1993). Os erros de omissão e comissão foram avaliados, a fim de ajustar o valor do limiar de mudança.

Os valores de níveis de cinza da imagem magnitude foram discretizados, o que produziu mapas temáticos. A partir de programações em LEGAL, as informações sobre a magnitude de mudanças foram combinadas com as informações sobre o tipo de alteração ocorrida com as classes: “não mudança”, “mudanças suaves” e “grandes mudanças”. Em seguida, pela união dos dois tipos de informação, foram produzidos mapas temáticos com as classes: “não mudança”, “regeneração suave”, “grande regeneração”, “cultura suave”, “grande cultura”, “queimada / água, suave”, “grande queimada / água”, “desmatamento suave”, “grande desmatamento”.

3.3.4 Validação

Para avaliar a acurácia do método de detecção de mudanças empregado, foi utilizada a Tabela de Validação citada anteriormente, que fornece informações sobre as mudanças de uso do solo a partir da interpretação visual da composição RGB das cenas. Este método substituiu os estudos de campo, por se tratar de uma alternativa rápida e sem custos para obtenção de dados de referência. Sua principal importância reside no fato de não haver mapas temáticos para a análise em longas séries temporais. É um procedimento que não necessita de grande suporte técnico e não requer elevados níveis de processamento de dados para a obtenção de métodos de referência.

Para cada ponto, dois níveis de informação foram estabelecidos: o primeiro nível envolve a informação binária de mudança ou não mudança, e o segundo descreve a natureza da mudança. Estas informações foram tabuladas e comparadas com a técnica de detecção de mudanças empregada neste trabalho, por meio de uma matriz de confusão.

As informações referentes à ocorrência de mudança foram originadas a partir da definição de um limiar sobre o vetor de mudanças. Foram gerados também dados sobre os erros de omissão ou comissão nesta classificação de mudanças. Assim, foram considerados erros de omissão os casos em que houve mudanças, de acordo com a interpretação visual, mas o valor do vetor de mudanças para aquele ponto é inferior ao limiar estabelecido. Os casos de comissão constituíram os eventos em que a interpretação visual acusa que o uso do solo não foi alterado, mas o valor do vetor de mudanças foi superior ao limiar definido.

A detecção do tipo de mudança também foi avaliada pela interpretação visual, que foi confrontada com as informações fornecidas pela direção do vetor de mudanças, ou seja, a combinação das variações de brilho e verdor. A matriz de erros e a análise pelo coeficiente Kappa foram utilizadas para avaliar a acurácia da detecção do tipo de mudanças. A análise Kappa é uma técnica multivariada discreta, usada em avaliações de acurácia (CONGALTON, 1991), e define a proporção em que uma área teste é corretamente classificada (como os tipos de mudanças). Para o cálculo do índice Kappa, é criada uma matriz de concordância, na qual os resultados do método avaliado são confrontados com dados de referência. Os valores ao longo da diagonal, isto é, as combinações nas quais o método concorda com a referência, são comparados com o valor total, nas demais posições da matriz para a obtenção de um valor de exatidão

(ROSENFELD e FITZPATRICK-LINS, 1986). A acurácia do método empregado, de acordo com os valores de Kappa, foi avaliada de acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977), que é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Classificação da acurácia.

k	Interpretação
0,81 – 1,00	Excelente
0,61 – 0,80	Muito boa
0,41 – 0,60	Boa
0,21 – 0,40	Razoável
0,0 – 0,2	Fraca
< 0,0	Muito fraca

Fonte: Landis e Koch (1977)

A partir da comparação dos valores de Kappa para os períodos 1975-1979 (MSS/MSS), 1979-1985 (MSS/TM), 1991-1995 (TM/TM) e 2005-2008 (CCD/TM), foi avaliada a eficiência do uso dos dados multisensores para a detecção de mudanças ao longo do tempo.

3.3.5 Alterações no uso do solo em Chapadão do Céu (GO) no período de 1975 a 2008

Com o objetivo de quantificar as áreas correspondentes a cada tipo de alteração nos períodos considerados, os mapas temáticos referentes às direções de mudanças foram vetorizados, e as áreas de cada classe foram tabuladas. Essas informações foram analisadas, considerando a época da aquisição das imagens e o calendário agrícola do Estado de Goiás.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Geração das imagens de brilho e verdor

A aplicação da Análise por Componentes Principais resultou nas imagens de brilho e verdor para cada uma das datas consideradas. Não foi possível diferenciar áreas agrícolas da vegetação, dado que esta avaliação depende da fitofisiomia do Cerrado considerada, e da época do ciclo fenológico das culturas. A cultura de soja caracteriza-se por apresentar uma densa camada superior de folhas, o que dificulta a penetração de luz nos estratos inferiores. Este comportamento é similar às condições em que o verdor e a proporção de sombra aumentam, como no caso da regeneração da vegetação arbórea nativa. Este estágio se dá no início da época de colheita, nos meses de janeiro e fevereiro, para a soja precoce, ou seja, antes do período da aquisição das imagens utilizadas neste trabalho. Por outro lado, as culturas de soja safrinha e milho estão em pleno vigor vegetativo nos meses de março a maio.

Foram avaliados os níveis de cinza das componentes, gerados a partir do rescalonamento dos autovalores das imagens. As classes de uso do solo apresentam valores altos ou baixos nas imagens de brilho e verdor, que são identificados na Tabela 4.1. As cenas referentes às demais datas de aquisição apresentam comportamento semelhante.

Tabela 4.1 . Valores de nível de cinza na primeira e na segunda componente principal.

Classes	Componentes Principais	
	CP1	CP2
Cerrado sensu strictu	baixo	alto
Agricultura	alto	baixo
Cicatrizas de queimadas e água	baixo	alto
Solo exposto	alto	baixo

A Figura 4.1 exibe as informações de brilho e verdor, referente à imagem adquirida em 14 de maio de 1995.

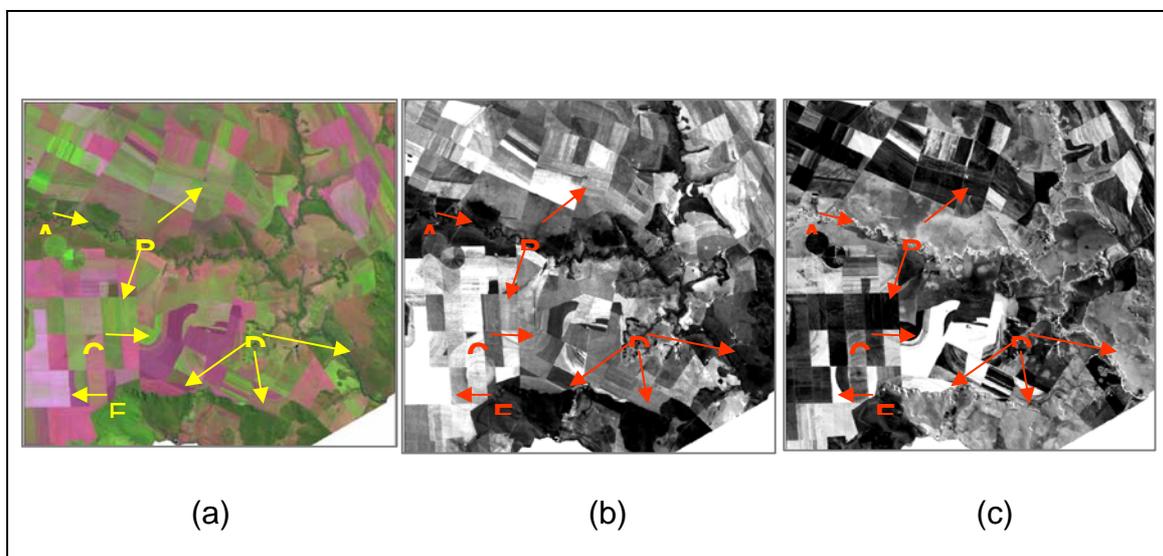


Figura 4.1 - Aplicação da Análise por Componentes Principais (a) Imagem TM Landsat. Data de aquisição: 14/maio/1995. Composição: R(5)G(4)B(3). (b) Primeira Componente Principal ou imagem de brilho. (c) Segunda Componente Principal ou imagem de verdor.

O ponto A refere-se a um segmento de um curso d'água, com valores baixos na imagem de brilho e valores altos na imagem de verdor; áreas queimadas ou de solo irrigado (ponto C) apresentam o mesmo comportamento. Os talhões agrícolas (ponto B), com culturas em estágio fenológico avançado apresentam alto valor de brilho e baixo valor de verdor. As regiões de vegetação nativa densa (ponto D) exibem baixos valores de brilho e altos de verdor. As áreas com solo exposto exibem valores altos de brilho e valores baixos na imagem de verdor (ponto E). Deste modo, a análise visual das imagens da primeira e da segunda componente principal indica que as imagens que seriam referentes às informações de brilho e verdor exibem desempenho diferente do esperado, ou seja, conforme a Tabela 3.5.

Embora a primeira e a segunda componentes principais não indiquem diretamente a condição de verdor e brilho, estas foram utilizadas como eixos de

um espaço de atributos para identificar as mudanças ocorridas ao longo do tempo.

4.2 Análise por Vetores de Mudanças (AVM)

A primeira e a segunda componente principais foram usadas como dados para a Análise por Vetores de Mudanças, gerando informações sobre dois níveis de mudança: 1) informação binária de mudança ou não-mudança, a partir de um limiar de alterações nas imagens de magnitude; e 2) informação sobre o tipo de alteração, de acordo com o sentido do vetor de mudanças.

A acurácia destas informações foi avaliada a partir de tabelas de validação com a informação sobre a interpretação visual e os resultados da AVM para 100 pontos selecionados aleatoriamente (Figura 4.2), para cada um dos intervalos de tempo adotados. Estas tabelas informam o uso do solo nas datas t e $t+1$, de acordo com a interpretação visual de composições RGB, para cada um dos pontos de referência.

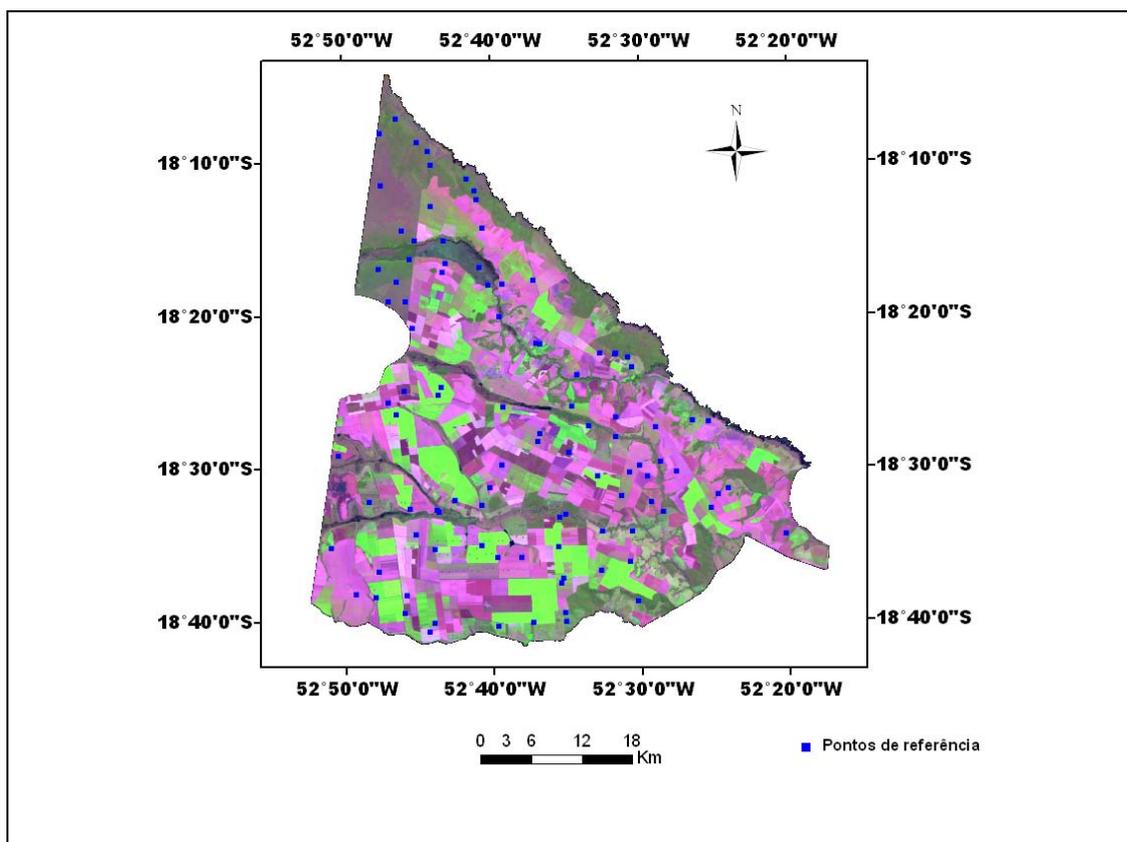


Figura 4.2 - Localização dos pontos amostrais utilizados como dados de referência. Imagem Landsat/TM. Data de aquisição: 30/março/2008. Composição: R(5)G(4)B(3).

4.3 Magnitude das mudanças

A Tabela de Validação com a informação binária de mudança compara os resultados da interpretação visual com o resultado da definição de limiares de mudança sobre a imagem de magnitude (Tabela 4.2). Estas tabelas informam o uso do solo nas datas t e $t+1$, de acordo com a interpretação visual de composições RGB, para cada um dos pontos de referência. Fornecem também o valor da magnitude de mudanças calculado para estes pontos. Quando este valor é igual ou superior ao limiar adotado, considera-se que AVM identificou um ponto de mudança. Foi atribuído o valor 1 na Tabela 4.2, de acordo com a situação de erro ou acerto pelo método.

Na definição do limiar de mudanças, foi adotado inicialmente, o valor de um desvio padrão dos valores da imagem de magnitude. Foi definido se houve ou não mudança entre os períodos, e se o limiar de um desvio padrão seria o ideal para a identificação das mudanças, de acordo com a porcentagem de acertos sobre a informação binária de mudança. No caso das cenas de 2005, foi considerado o desvio padrão dos níveis de cinza do mosaico.

No caso de alvos com semelhanças espectrais (por exemplo, campo limpo em um período, e solo na data subsequente), optou-se por considerar a condição que aumentasse a proporção de acertos. O mesmo artifício foi adotado para áreas de transição (por exemplo, estradas adjacentes a solo e cultura densa, Figura 4.3). Como resultado, a porcentagem de acertos variou de 68 a 81% (Tabela 4.3).

Tabela 4.2 - Tabela de Validação com a informação binária de mudança.

Ponto	Interpretação visual		AVM		Acertos	Erros		
	1975	1979	Houve mudança?	Valor da magnitude de mudanças		Houve mudança?	Comissão	Omissão
	Mata ciliar	Mata ciliar	0	12	1	0	1	0
1	Vegetação nativa densa	Solo (pouco brilho)	1	29	1	1	0	0
2	Vegetação nativa densa	Solo com pouca vegetação, próximo a mata ciliar	1	3	0	0	0	1
3	Vegetação nativa densa	Solo (área agrícola)	1	43	1	1	0	0
4
100	Solo com pouca vegetação (área agrícola)	Solo (área agrícola)	0	37	1	0	1	0
Total						79	13	08

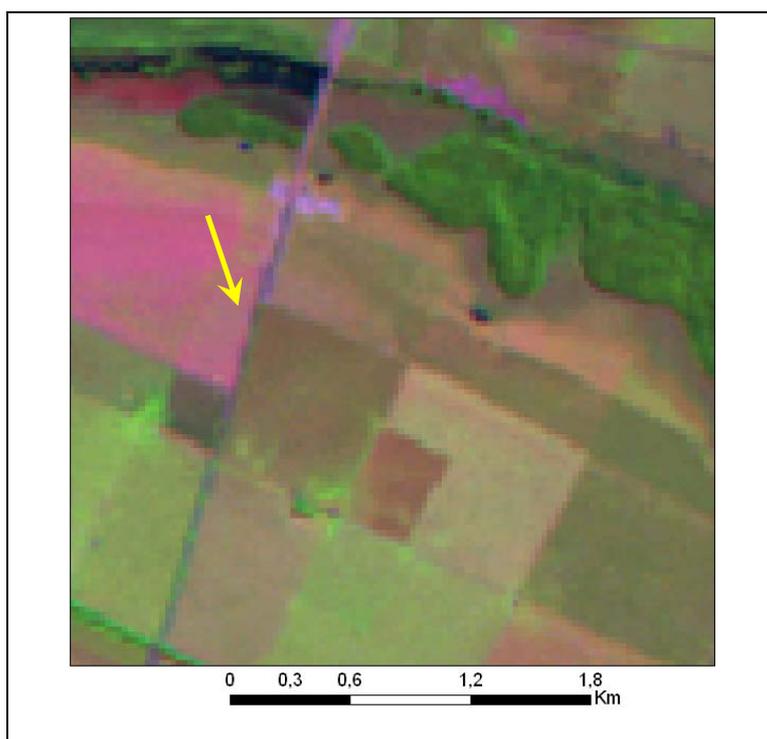


Figura 4.3 – Transição entre diferentes coberturas da terra.

Tabela 4.3 - Erros de omissão e comissão a partir da adoção de limiar igual a um desvio padrão.

Limiar: 1 desvio padrão

1975 - 1979			1979 - 1985			1985 - 1991		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
68	13	19	70	14	16	74	18	08
1991 - 1995			1995 - 2000			2000 - 2005		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
81	08	11	80	08	12	72	13	15
2005 - 2008			1975 - 1991			1991 - 2008		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
69	13	18	72	16	12	72	08	20

Acertos: 658/900 (73,1%)

Erros - Comissão: 111/900 12,3%)

Omissão: 131/900 (14,6%)

Omissão > Comissão

Comissão > Omissão

Com objetivo de aumentar os acertos e, dado que a porcentagem de erros de omissão foi superior à de erros de comissão, o limiar de mudança foi ajustado para $\frac{1}{2}$ desvio padrão. Os procedimentos de identificação de mudanças pela composição RGB foram repetidos. Esta redução permitiu identificar mudanças mais sutis, mas aumentou os erros, sem ganhos na proporção de acertos (Tabela 4.4). Alguns dos erros de comissão, bem como os erros de omissão que permaneceram, estavam associados a valores de magnitude de mudanças muito próximos ao limiar estabelecido, ou seja, poderiam constituir acerto caso este fosse mais flexível.

Tabela 4.4 - Erros de omissão e comissão a partir da adoção de limiar igual a $\frac{1}{2}$ desvio padrão.

Limiar: $\frac{1}{2}$ desvio padrão

1975 - 1979			1979 - 1985			1985 - 1991		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
71	20	09	73	25	02	69	29	02
1991 - 1985			1995 - 2000			2000 - 2005		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
79	19	02	83	15	02	70	23	07
2005 - 2008			1975 - 1991			1991 - 2008		
Acertos	Erros		Acertos	Erros		Acertos	Erros	
	Com	Omi		Com	Omi		Com	Omi
61	29	10	80	18	02	79	13	08

Acertos: 665/900 (73,9%)

Erros - Comissão: 191/900 (21,2%)

Omissão: 44/900 (4,9%)

Acertos com $\frac{1}{2}$ desvio padrão > acertos com 1 desvio padrão

Nos dois maiores períodos de tempo (1975 a 1991 e 1991 a 2008), os erros de comissão foram menores, dada a possibilidade de que tenha havido maiores mudanças. Em quaisquer dos valores de limiar considerados, a maior parcela dos acertos de não mudança estavam associados a áreas de vegetação nativa densa.

Embora o acréscimo nos acertos não tenha sido considerável, optou-se pela adoção de $\frac{1}{2}$ desvio padrão como limiar de mudanças. Os pixels com valores acima desse limite foram classificados como “mudança suave” ou “grande mudança”. O menor limiar de mudanças reconhece alterações mais sutis, como diferentes estágios de sucessão florestal e diferentes fases fenológicas da cultura. Apesar de este trabalho não abordar tal nível de detalhamento, essa característica separa melhor grandes e suaves mudanças.

Foram atribuídas classes de intensidade (mudanças suaves ou grandes mudanças) de acordo com o valor do pixel na imagem de magnitude de mudanças. A Tabela 4.5 esquematiza a intensidade das mudanças de acordo com o valor do pixel na imagem de magnitude, considerando a média (μ) e o desvio padrão (σ).

Tabela 4.5 – Atribuição de classes de intensidade de mudança, de acordo com o valor da magnitude

Classes de intensidade de mudanças	Valor da magnitude do vetor de mudanças
Não-mudança	0 a $\frac{1}{2} \sigma$
Mudanças suaves	$\frac{1}{2} \sigma$ a 1σ
Grandes mudanças	1σ a 255

A Figura 4.4 exibe duas situações de erro associado ao limiar de mudança, em que a região f representa um intervalo de valores de magnitude de mudanças em que podem ocorrer esses erros, e a região A simboliza os valores em que efetivamente houve mudanças. O histograma (a) representa um caso em que os erros de comissão (ϵ_{com}) identificados devem-se a um valor de magnitude um pouco acima do limiar definido (L_m). De modo semelhante, alguns erros de omissão (ϵ_{om}) referem-se a valores de magnitude de mudança que estão um pouco abaixo do limiar estabelecido (b).

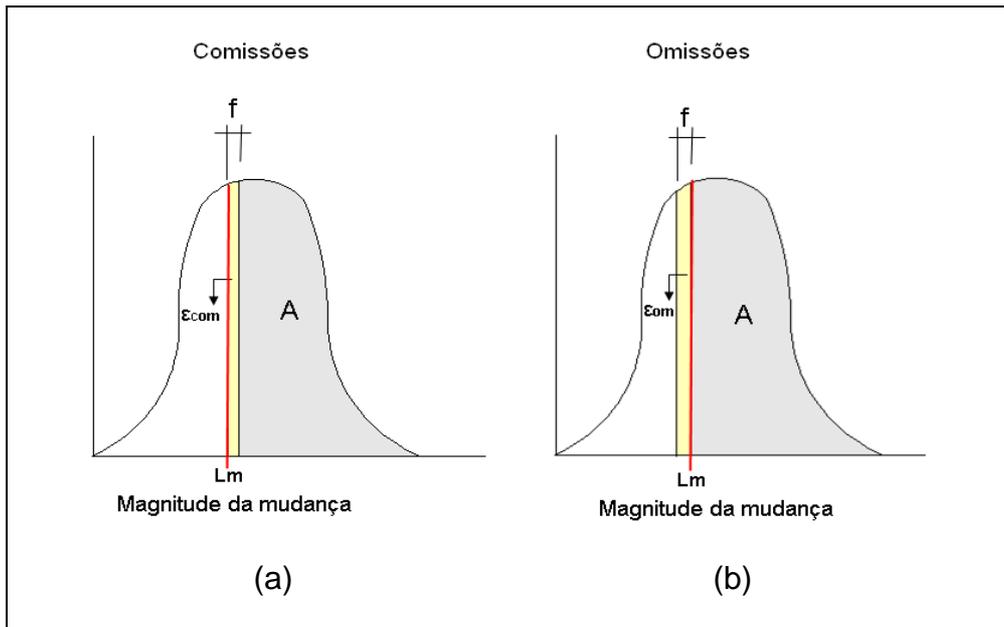


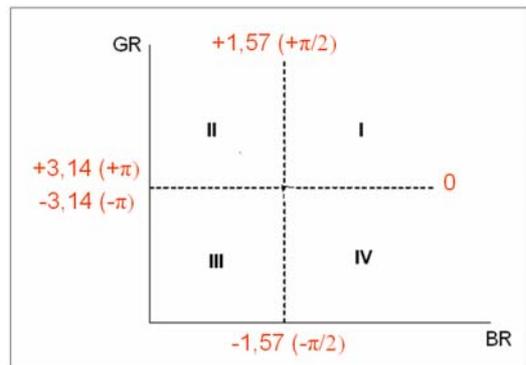
Figura 4.4 - Definição dos limiares de mudança.

4.4 Caracterização das mudanças

O cálculo dos vetores de mudanças resultou em grades regulares com valores que variam de -3,14 a +3,14. Estas grades foram divididas de acordo com a Tabela 4.6, de modo que fosse possível identificar os tipos de mudanças em um mapa temático.

Tabela 4.6 - Direção dos vetores de mudanças e respectivas classes.

Mudança	Quadrante	Intervalo
Agricultura	I	0,00 a +1,57
Solo	II	+1,57 a 3,14
Queimada	III	-3,14 a -1,57
Regeneração	IV	-1,57 a 0,00



O valor do vetor independe se houve mudança ou não, mas está relacionado com a variação do uso do solo nas datas t e $t+1$. Entretanto, os resultados devem ser avaliados em termos de variação de brilho e verdor, e não na simples identificação de mudanças para uma classe determinada. Por exemplo, as modificações relacionadas ao brilho podem ser resultantes das condições radiométricas no momento da aquisição das imagens, e as alterações relacionadas ao verdor se devem à intensidade do incremento da fitomassa, seja esta de áreas agrícolas ou de vegetação nativa. Áreas em que não houve mudança de uso, como matas ciliares podem exibir comportamento variável, em função de alterações fenológicas e hidrológicas.

As classes “Regeneração” e “Agricultura” devem apresentar valores mais altos na segunda componente principal, associada ao verdor da vegetação. A classe “Regeneração” acusa áreas em que a fitomassa cresceu a ponto de produzir sombra, diminuindo o valor de brilho, característica esta que pode ser avaliada pela primeira componente principal. As áreas com cicatrizes de queimadas ou com solo irrigado exibem baixos valores de reflectância e, portanto, apresentam baixos valores na primeira componente principal. Os corpos d’água em geral não apresentam fitomassa que possa ser identificada pela imagem de verdor, com exceção aqueles em que a mata ripária seja abundante.

Os produtos destes processamentos foram, portanto, as imagens de magnitude, o mapa temático que indica as direções de mudanças, e o mapa temático resultante do cruzamento destas duas, para cada um dos períodos considerados. A Figura 4.5 representa a imagem de magnitude e o mapa temático da direção de mudanças referente ao período de 1991 a 1995. As Figuras 4.6 a 4.10 exibem esses mapas temáticos.

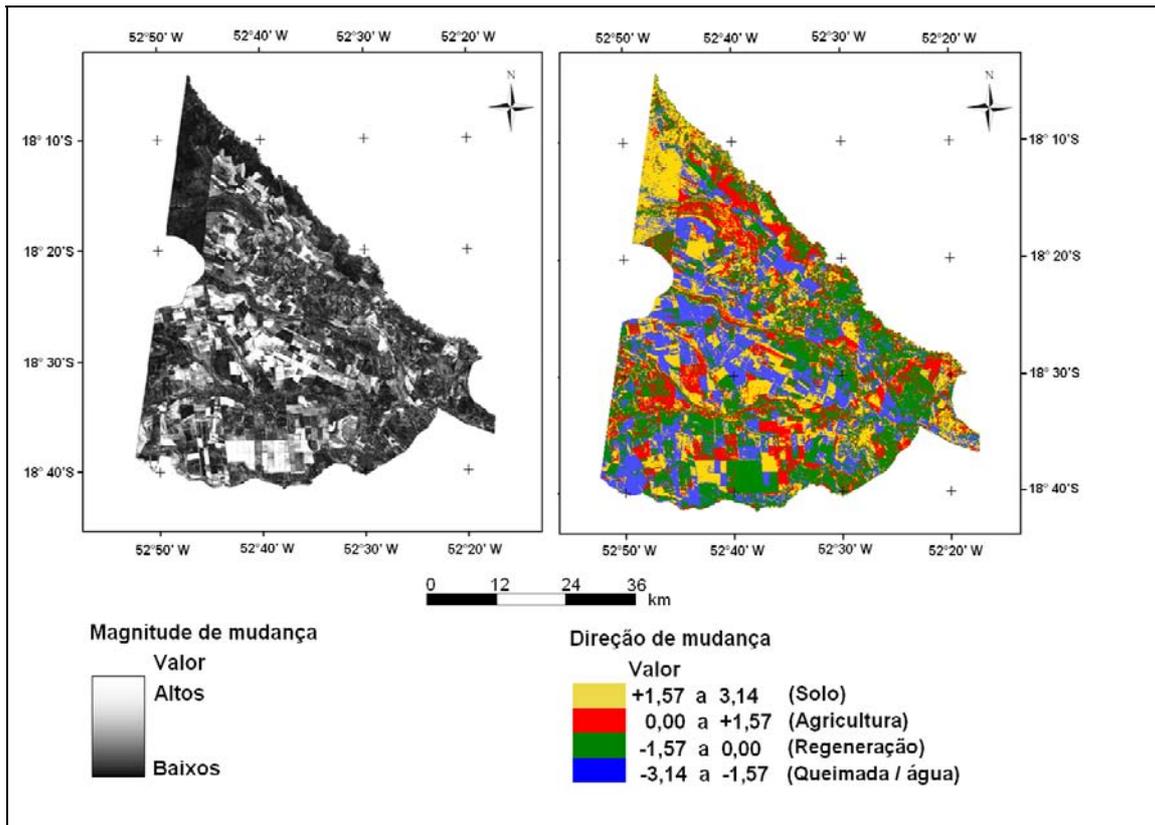


Figura 4.5 - Imagens de magnitude e direção de mudanças ocorridas entre 1991 e 1995.

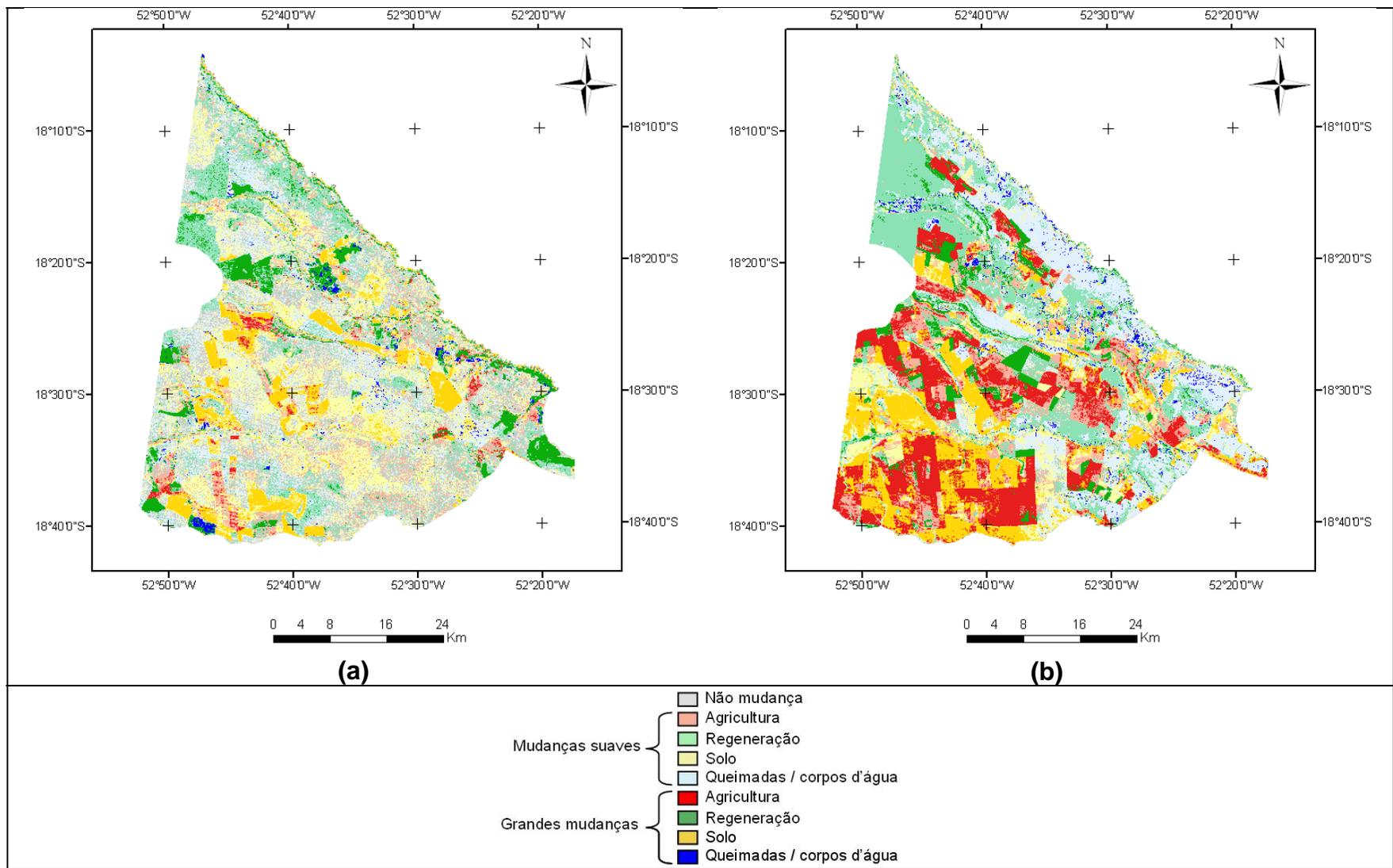


Figura 4.6 - Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1975 a 1979 (a) e 1979 a 1985 (b).

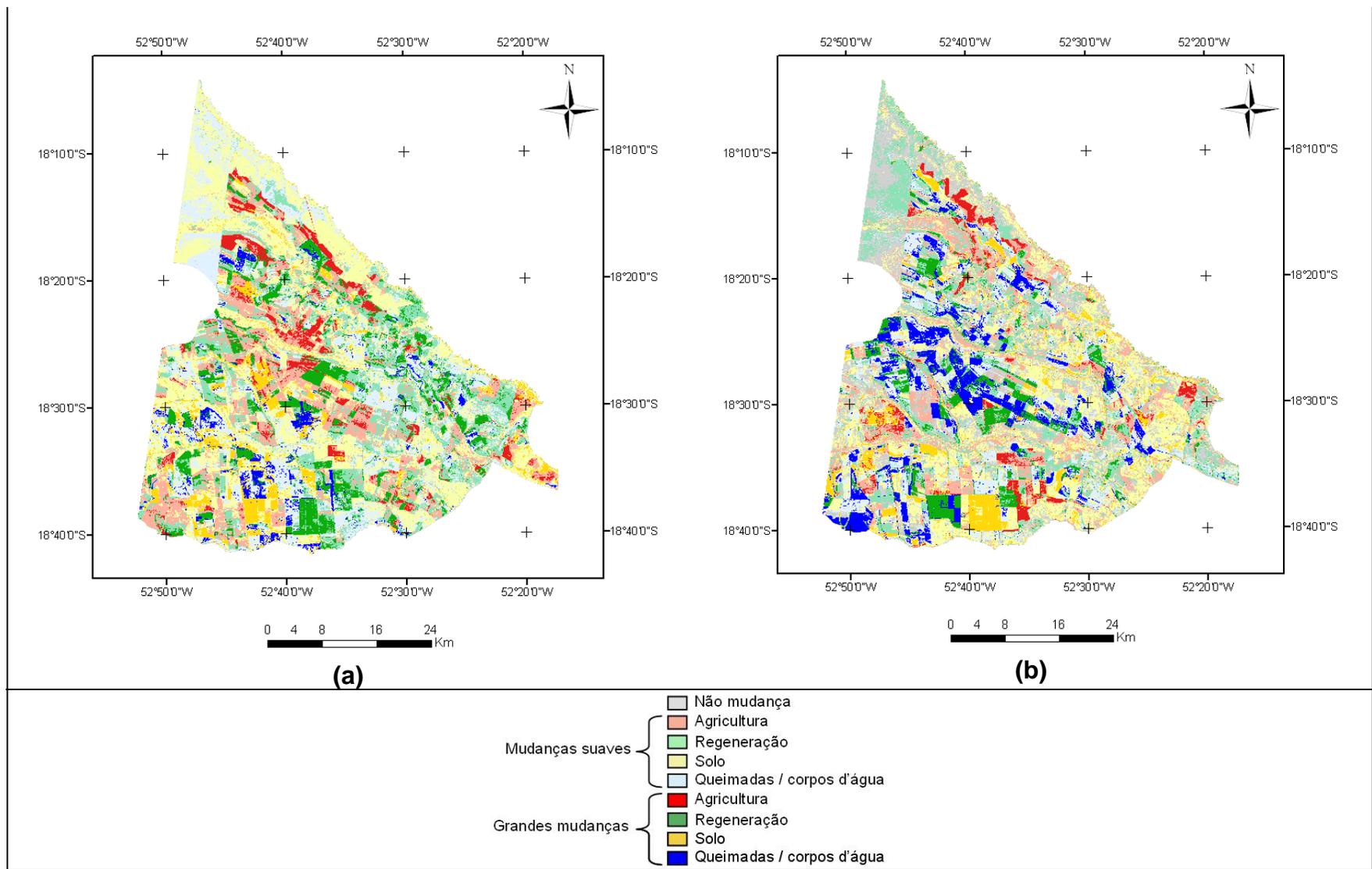


Figura 4.7 - Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1985 a 1991 (a) e 1991 a 1995 (b).

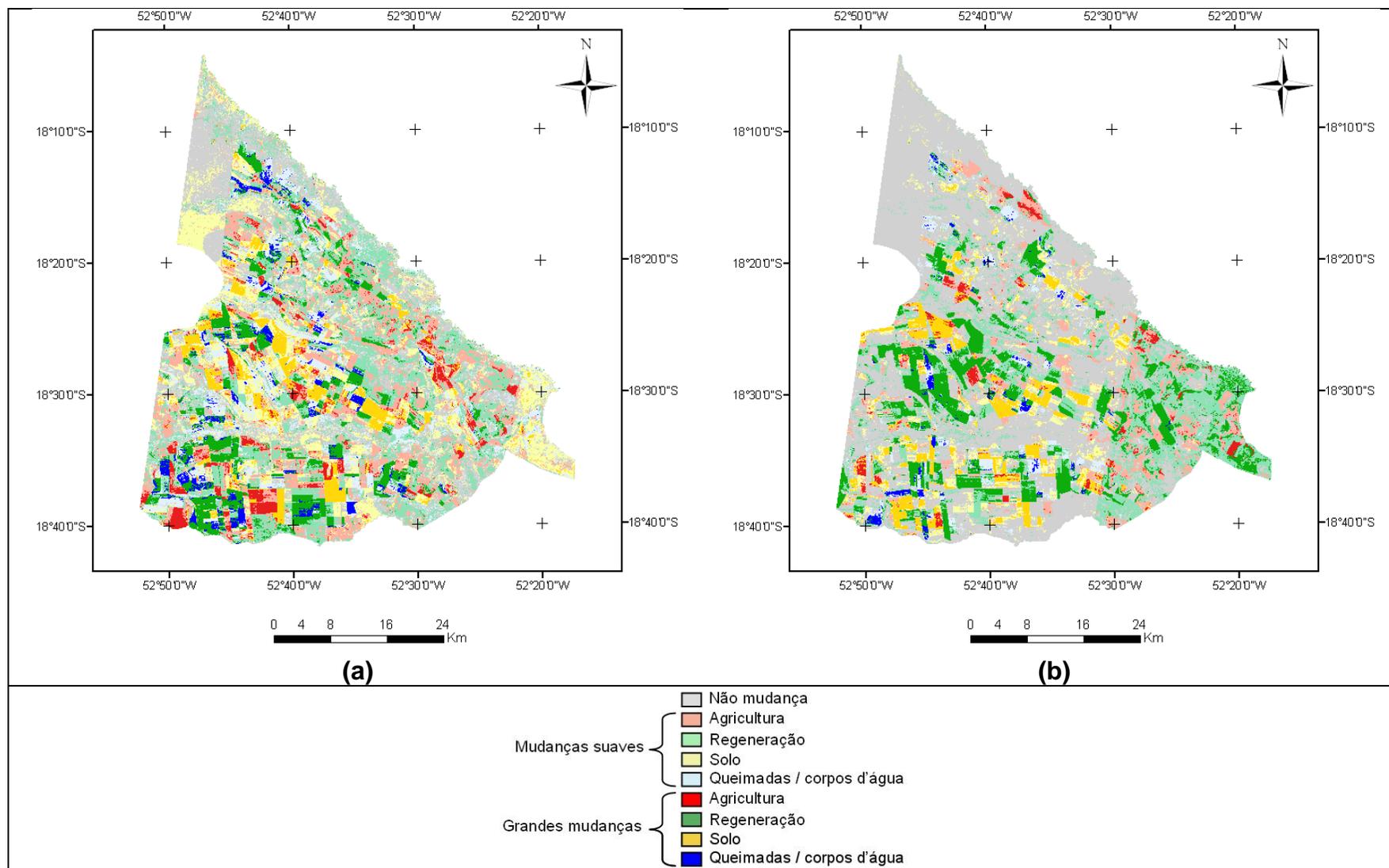


Figura 4.8 - Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1995 a 2000 (a) e 2000 a 2005 (b).

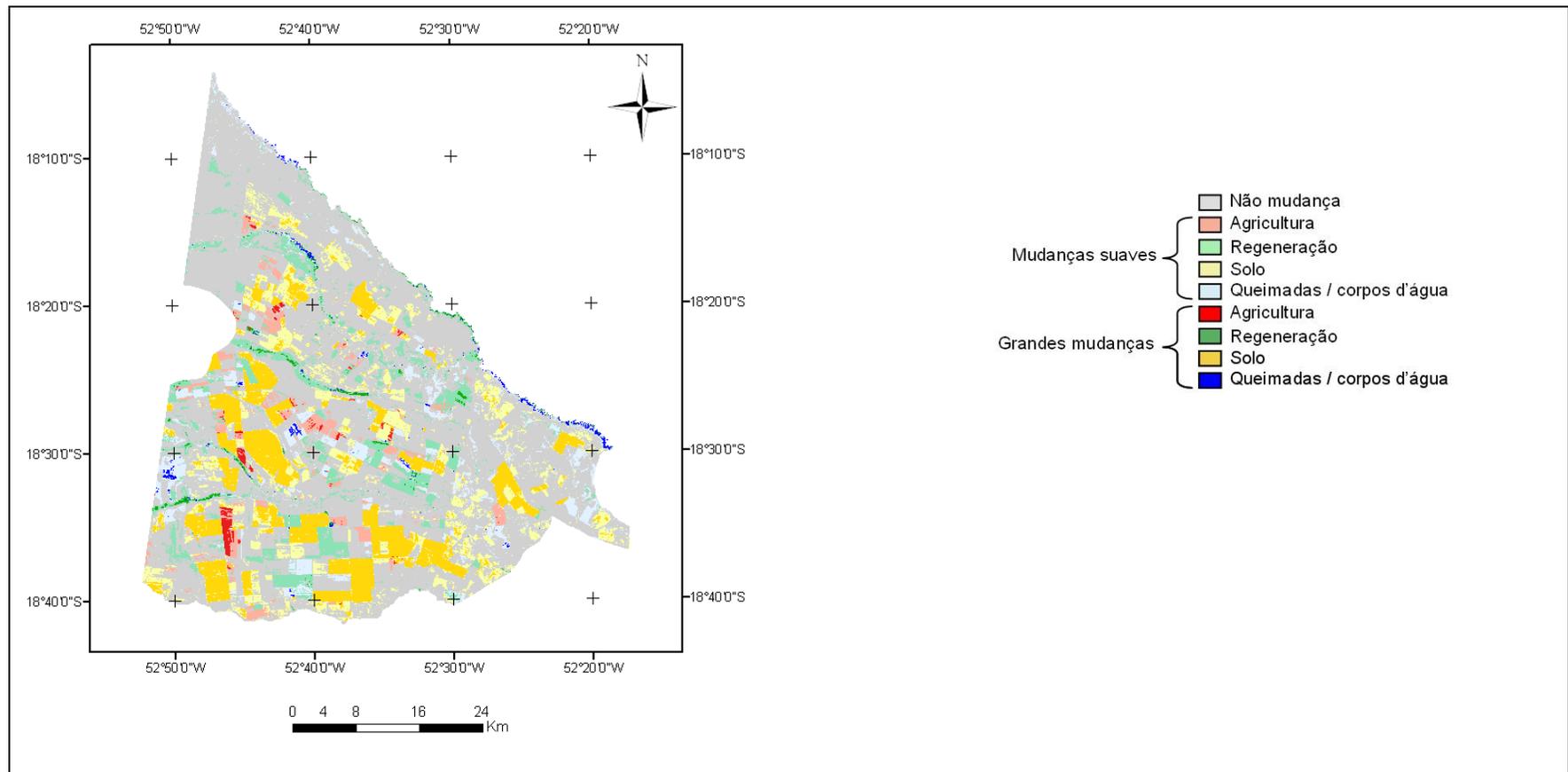


Figura 4.9 - Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 2005 a 2008.

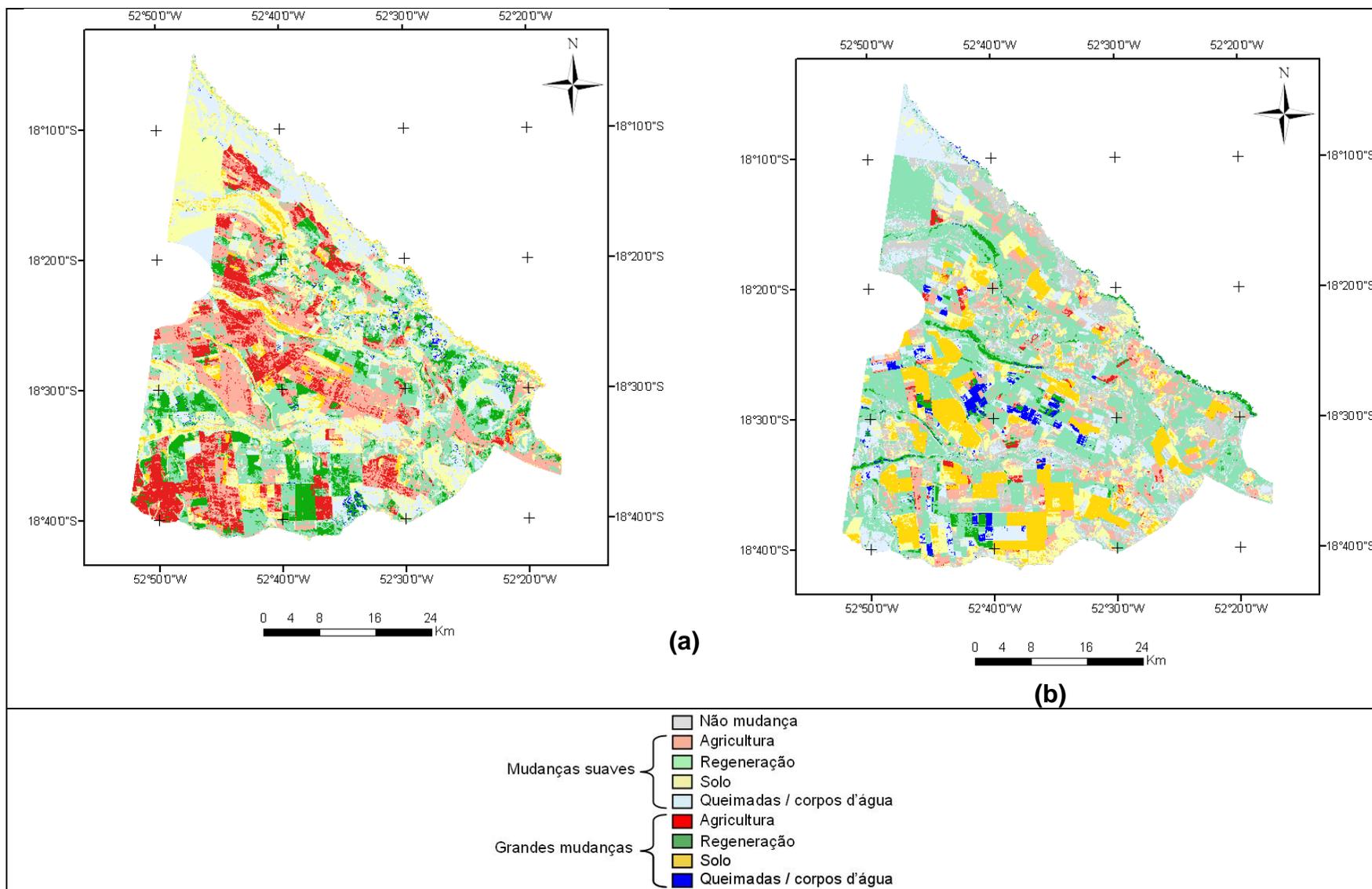


Figura 4.10 - Dinâmicas de cobertura da terra a partir da Análise por Vetores de Mudanças. Período de 1975 a 1985 (a) e 1985 a 2008 (b).

As regiões identificadas como não-mudança referem-se a alvos que não têm tanta variação, como as áreas de veredas e parte do Parque Nacional das Emas, cujas modificações se devem a mudanças sazonais da vegetação natural, e não a mudanças de uso do solo.

4.5 Análise de exatidão

A Tabela de Validação de tipo de mudanças (Tabela 4.7) foi empregada na validação dos resultados da Análise por Vetores de Mudanças. O tipo de mudança observado pela interpretação visual foi comparado com o tipo de mudança indicado pela direção do vetor de mudanças, conforme a Tabela 4.5. Para cada um dos pontos que foram identificados como “mudança”, ou seja ficaram acima do limiar na análise anterior, foram identificados os tipos de alteração esperado e observado, nas colunas de tipos de mudanças. Os tipos de mudanças são rotulados como a combinação das classes: Regeneração (R), Queimada ou água (Q), Solo (S) e Cultura (C), onde o tipo de mudança ij representa a mudança observada j , quando se é esperada a mudança i , ($i = \{R, Q, S, C\}$; $j = \{R, Q, S, C\}$).

Foi adicionado o valor 1,0 em uma das colunas de comparação de mudanças, de modo que no final da tabela, estivesse indicando o valor total de cada tipo de acerto (RR, DD, QQ, SS) ou erro (demais colunas) na identificação das mudanças. Nos casos em que o valor da magnitude ficou abaixo do limiar, foi adicionado o valor 1 na coluna “não mudou”.

A partir do valor total de cada tipo de mudança, foi gerada a matriz de contingência para cada intervalo de mudanças. A identificação do tipo de alteração do uso do solo a partir da direção dos vetores de mudança foi avaliada pelo coeficiente Kappa calculado para cada um dos períodos considerados. As matrizes de erros geradas para comparar as informações oriundas da interpretação visual e da Análise por Vetores de Mudanças são

apresentadas na Tabela 4.8. Os pontos amostrais que foram identificados corretamente pela AVM estão quantificados na diagonal principal, ao passo que os erros de omissão estão nas demais células da matriz.

Tabela 4.8 - Matriz de confusão para os períodos considerados.

1975-1979		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	9	1	2	0	12	25
	Queimada/água	0	3	0	0	3	0
	Solo	8	4	24	12	48	50
	Agricultura	0	2	2	3	7	57
Total esperado		17	10	28	15	70	Kappa = 0,33
Erros de omissão (%)		47	70	14	80		

1979-1985		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	20	2	1	1	24	17
	Queimada/água	0	3	2	2	7	57
	Solo	6	2	14	7	29	52
	Agricultura	5	0	1	3	9	67
Total esperado		31	7	18	13	69	Kappa = 0,41
Erros de omissão (%)		35	57	22	77		

1985-1991		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	17	0	3	1	21	21
	Queimada/água	0	1	2	0	3	3
	Solo	6	1	4	5	16	16
	Agricultura	9	3	3	3	18	18
Total esperado		32	5	12	9	58	Kappa = 0,18
Erros de omissão (%)		47	80	67	67		

(continua)

Tabela 4.8 - Continuação

		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
1985-1991		Regeneração	Queimada/ água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	17	0	3	1	21	21
	Queimada/ água	0	1	2	0	3	3
	Solo	6	1	4	5	16	16
	Agricultura	9	3	3	3	18	18
Total esperado		32	5	12	9	58	
Erros de omissão (%)		47	80	67	67		Kappa = 0,18

		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
1991-1995		Regeneração	Queimada/ água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	12	0	2	3	17	17
	Queimada/ água	0	3	1	1	5	5
	Solo	3	0	11	3	17	17
	Agricultura	8	15	4	6	33	33
Total esperado		23	18	18	13	72	
Erros de omissão (%)		48	83	39	54		Kappa = 0,27

		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
1995-2000		Regeneração	Queimada/ água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	13	3	0	0	16	19
	Queimada/ água	0	2	1	0	3	33
	Solo	2	0	8	6	16	50
	Agricultura	17	3	4	11	35	69
Total esperado		32	8	13	17	70	
Erros de omissão (%)		59	75	38	35		Kappa = 0,29

		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
2000-2005		Regeneração	Queimada/ água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	10	1	1	0	12	17
	Queimada/ água	0	7	0	0	7	0
	Solo	7	0	9	2	18	50
	Agricultura	2	2	12	6	22	73
Total esperado		19	10	22	8	59	
Erros de omissão (%)		47	30	59	25		Kappa = 0,39

(continua)

Tabela 4.8 - .Continuação

2005-2008		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	10	1	1	0	12	12
	Queimada/água	0	7	0	0	7	7
	Solo	7	0	9	2	18	18
	Agricultura	2	2	12	3	19	19
Total esperado		19	10	22	5	56	
Erros de omissão (%)		47	30	59	40	Kappa = 0,36	

1975-1991		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	7	1	1	0	9	9
	Queimada/água	0	3	0	0	3	3
	Solo	14	3	13	4	34	34
	Agricultura	4	2	6	8	20	20
Total esperado		25	9	20	12	66	
Erros de omissão (%)		18	6	7	4	Kappa = 0,27	

1991-2008		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	12	2	0	1	15	15
	Queimada/água	0	6	0	1	7	7
	Solo	10	3	1	6	20	20
	Agricultura	3	5	8	12	28	28
Total esperado		25	16	9	20	70	
Erros de omissão (%)		52	63	89	40	Kappa = 0,26	

Geral		Observado				Total observado	Erros de comissão (%)
		Regeneração	Queimada/água	Solo	Agricultura		
Esperado	Regeneração	110	11	11	6	138	20
	Queimada/água	0	35	6	4	45	22
	Solo	63	13	93	47	216	57
	Agricultura	50	34	52	75	211	64
Total esperado		223	93	162	132	610	
Erros de omissão (%)		51	62	43	43	Kappa = 0,34	

O valor calculado para o coeficiente Kappa variou de 0,18 a 0,41, indicando que a Análise por Vetores de Mudanças exibe concordância fraca ou regular

em relação à interpretação visual. A Tabela 4.9 apresenta uma avaliação da acurácia do método de acordo com classificação de Landis e Koch (1977).

Tabela 4.9 - Classificação da acurácia da AVM para os períodos considerados.

Período	Dados multissensores	Concordância simples	Concordância ao acaso	Kappa	Classificação da acurácia
1975 - 1979	Não	0,557	0,343	0,33	Razoável
1979- 1985	Sim	0,580	0,301	0,41	Boa
1985 -1991	Não	0,431	0,309	0,18	Fraca
1991 -1995	Não	0,444	0,235	0,27	Razoável
1995 - 2000	Não	0,486	0,273	0,29	Razoável
2000 - 2005	Sim	0,542	0,250	0,39	Razoável
2005 - 2008	Sim	0,518	0,252	0,36	Razoável
1975 - 1991	Sim	0,470	0,269	0,27	Razoável
1991 - 2008	Não	0,443	0,250	0,26	Razoável
Geral	-	0,513	0,263	0,34	Razoável

No cálculo do coeficiente Kappa, a concordância ao acaso considera concordâncias efetivas e, portanto, o valor de k pode subestimar a concordância do método (Congalton e Green, 1998). A partir da matriz de contingência, foram avaliadas as concordâncias simples e ao acaso, que variaram de 43 a 58% e 23 a 34%, respectivamente. Não é possível afirmar que estes valores estão associados ao fato de o produto analisado ser resultante da combinação de dados multissensores. Em relação à escala temporal, os períodos que abrangem maior intervalo de tempo (1975 a 1991 e 1991 a 2008) não apresentaram resultados diferentes dos demais. Isto não é decorrente da adoção de limiares de alteração, visto que estes interferem apenas na informação binária de mudança ou não-mudança.

Foram aplicados testes chi-quadrado para analisar o quanto os valores observados diferiram dos valores esperados. Considerando um nível de significância de 0,05, foi verificado que o resultado da Análise por Vetores de Mudanças é superior a uma classificação aleatória.

As matrizes de erros referentes aos períodos de 2000 – 2005, 2005-2008, 1975-1991 e 1991 a 2008 indicam erros relacionados aos pontos amostrais nos quais era esperada a indicação da classe “Solo”, mas o método apontou a regeneração da cobertura vegetal. A identificação errônea de espaços agrícolas pelos vetores de mudança, em detrimento da indicação regiões com solo exposto nos período de 1975-1979 e 1995-2000 é um caso semelhante. Estes equívocos se devem ao fato de que o resultado da AVM depende da condição de brilho e verdor nas cenas e sua variação no período em questão.

A avaliação da acurácia das técnicas de detecção de mudanças é comprometida pela dificuldade da aquisição de mapas-base que assegurem a validação dos métodos, principalmente quando são considerados dados multitemporais. Além das questões tangentes à acurácia dos resultados, a existência de mapas temáticos, gerados pelo processamento de imagens orbitais ou não, permite a definição dos limiares de mudança a partir de toda a área de estudo, e não apenas por pontos amostrais. A combinação de mapas de uso e mapas representativos da informação binária de mudança / não mudança permite o ajuste do limiar pela análise dos erros de omissão e comissão, conforme realizado neste trabalho, mas com maior nível de confiabilidade, dado que são consideradas as informações sobre toda a área de interesse.

As Figuras 4.11 a 4.14 exibem detalhes de mudanças ocorridas em cada um dos intervalos de tempos, com a composição colorida das imagens orbitais. As imagens MSS, TM e CCD apresentam composição R (2) G(4) B (3), R (5) G(4) B (3), e R (3) G(4) B (2), respectivamente.

A Figura 4.11 exibe regiões em que houve mudança de solo exposto para vegetação, com identificação correta de regeneração (A). Regiões que tiveram a cobertura vegetal reduzida (B) e (C) também podem ser visualizadas.

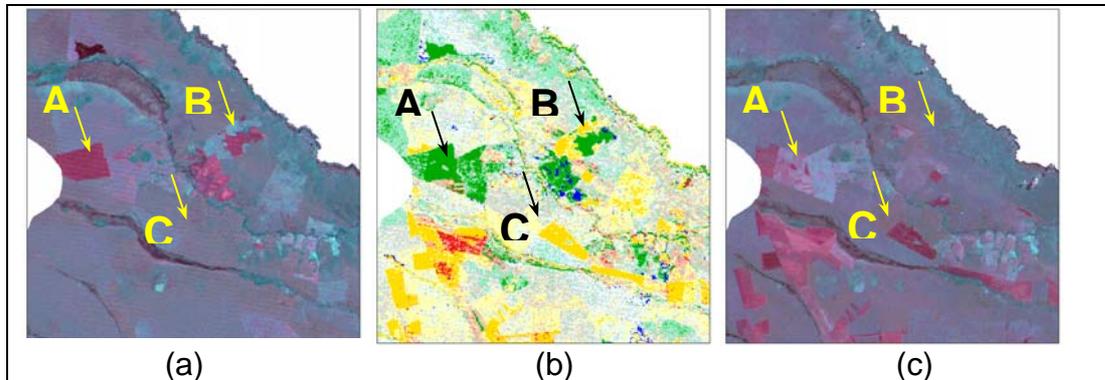


Figura 4.11 – (a) e (c) Imagens MSS / Landsat. Composição R(2)G(4)B(3). Datas de aquisição: 14.05.1975 e 02.05.1979. (b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1975 a 1979.

Regiões em que as mudanças estão associadas a apenas variações fenológicas (Figura 4.12, ponto A) exibem redução na componente brilho, em função do desenvolvimento da vegetação e aumento de sombra. O mapa referente ao período de 1979 a 1985 também acusa mudanças equivocadas, como a identificação de áreas agrícolas onde há transição para solo exposto (ponto B), e também o contrário (ponto C). O ponto D identifica uma área queimada como uma área cuja vegetação foi regenerada.

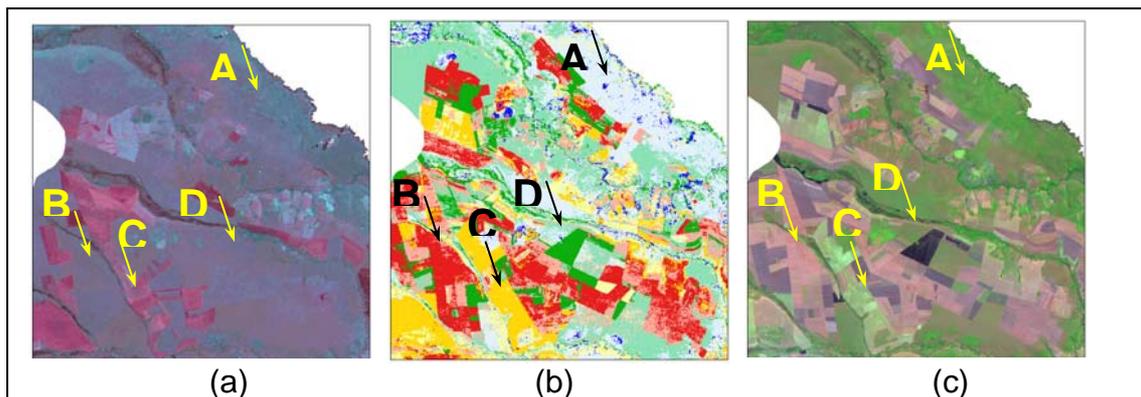


Figura 4.12 – (a) Imagem MSS / Landsat. Composição R(2)G(4)B(3). Datas de aquisição 14.05.1979. (b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1979 a 1985. (c) Imagem TM / Landsat. Composição R(5)G(4)B(3). Data de aquisição: 19.06.1985.

Na Figura 4.13, em que são identificadas as mudanças do período de 1985 a 1991, o mesmo talhão é representado corretamente como regeneração (ponto B). Este mapa temático exibe regiões de confusão entre vegetação nativa e culturas agrícolas (ponto A), além da identificação de intensa redução de brilho por conta do incremento da vegetação (ponto C).

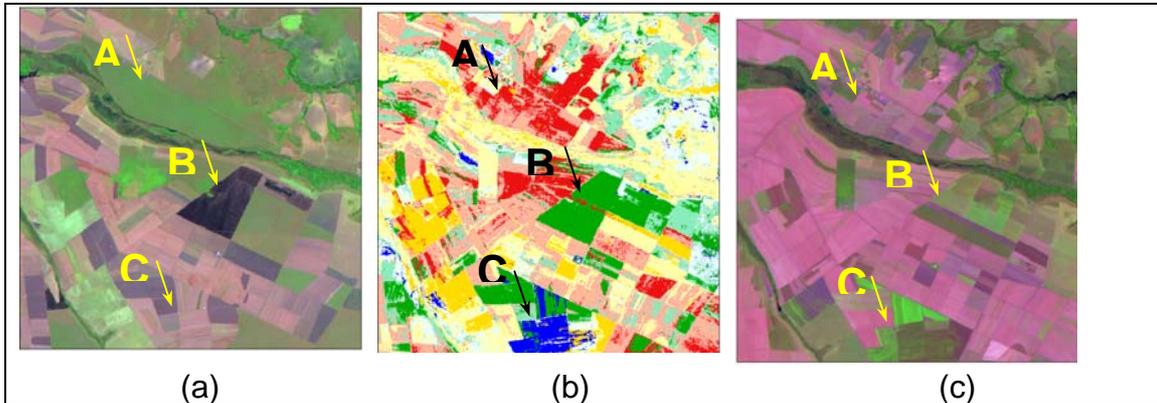


Figura 4.13 (a) e (c) Imagens TM / Landsat. Composição R(5)G(4)B(3). –
 – Datas de aquisição: 19.06.1985 (a) e 19.05.1991(c). (b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1985 a 1991.

A transição de áreas cultivadas para solo preparado (A) e a situação inversa (B) são exibidas no mapa temático referente ao período de 2000 a 2005 (Figura 4.14). Neste período, a expansão da atividade agrícola já está estabilizada e, portanto, há grandes áreas que são identificadas como “não mudança”.

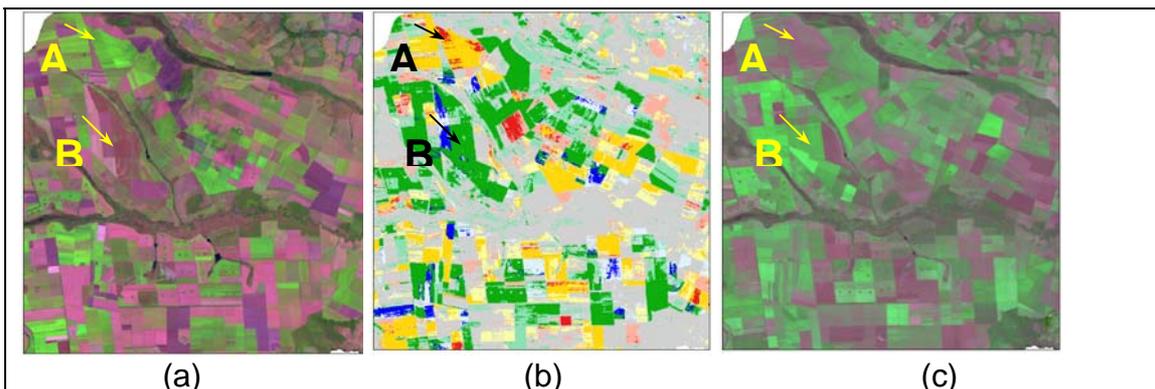


Figura 4.14 - (a) Imagem TM / Landsat. Composição R(5)G(4)B(3). Data de aquisição: 27.05.2000. (b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 2000 a 2005. (c) Imagem CCD / CBERS 2. Composição R(3)G(4)B(2). Data de aquisição: 14.05.2005.

A variação da componente brilho pode estar associada à condição da precipitação na época da aquisição das imagens. A Figura 4.15 apresenta a precipitação acumulada mensal nos períodos de análise e indica que os períodos em que o método identificaria incremento na componente brilho seriam os intervalos 1975 a 1979, 1991 a 1995, 2000 a 2005 e 1991 a 2008. Por outro lado, indicaria redução do brilho nos períodos 1979 a 1985, 1995 a 2000, 2005 a 2008 e 1975 a 1991.

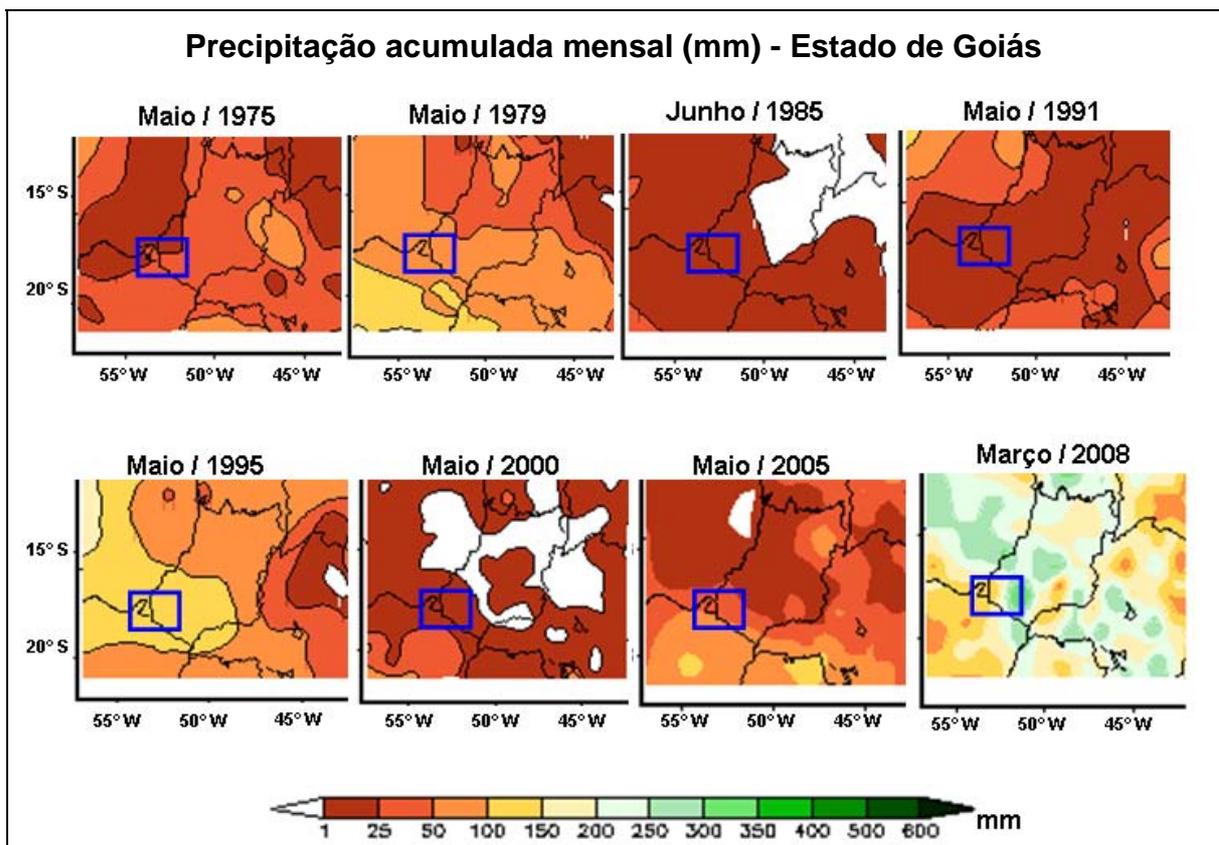


Figura 4.15 - Precipitação acumulada mensal no Estado de Goiás para os meses das cenas utilizadas.
Fonte: CPTEC / INPE (2009)

De modo geral, os erros se devem a confusões espectrais associadas à cobertura do solo natural ou antrópica, tal como campo sujo e pasto, além de incrementos na biomassa vegetal, que podem se referir à regeneração florestal ou desenvolvimento de culturas agrícolas. A diminuição do brilho também implica em equívocos, com a indicação equivocada de queimadas ou umidade.

Pode haver ainda ocasiões em que há variação em apenas um dos parâmetros de análise, neste caso, brilho e verdor, identificados pelas primeira e segunda componentes principais, respectivamente. Por exemplo, a transição de biomassa densa para agricultura implicaria na alteração no brilho, mas o verdor pode permanecer constante. Deste modo, eventuais conflitos na identificação das alterações do uso do solo podem ocorrer. Por exemplo, a transição de fitomassa densa para uma cicatriz de queimada ou corpo d'água pode apresentar o mesmo resultado que a conversão de cultura para solo exposto, pois ambas as condições implicam na diminuição do verdor e conservação da intensidade do brilho. A Tabela 4.10 apresenta as situações de confusão na Análise por Vetores de Mudanças quando são utilizadas as componentes principais como dados de entrada.

Foram frequentes as confusões entre classes de mudanças de quadrantes adjacentes (Tabela 4.6). Por exemplo, Solo - Agricultura, Agricultura - Regeneração, Regeneração - Queimada ou água. Provavelmente, o estabelecimento de limites rígidos não é adequado na definição das classes, sendo necessário verificar com maior detalhamento os valores da direção dos vetores para cada uma das classes.

Além destas classes de cobertura da terra, ainda há a condição de pousio que consiste em um período de repouso das terras cultivadas para que estas recuperem a fertilidade do solo. Neste período em que não há manejo do solo, a biomassa de plantas invasoras aumenta e, dependendo do tempo de abandono da terra, esta pode se assemelhar mais a solo exposto ou a vegetações campestres. Assim, áreas produtivas podem apresentar características semelhantes àquelas de baixo vigor vegetativo, dependendo da condição de pousio na época de aquisição da cena.

Tabela 4.10 - Situações de ambiguidade na identificação de mudanças.

Uso do solo		Parâmetro alterado
Data t	Data t +1	
Fitomassa densa (1ª CP-, 2ª CP+)	Cultura (1ª CP+, 2ª CP+)	1ª CP aumenta
Fitomassa densa (1ª CP-, 2ª CP+)	Cicatriz de queimada / água (1ª CP-, 2ª CP-)	2ª CP diminui
Cultura (1ª CP+, 2ª CP+)	Fitomassa densa (1ª CP-, 2ª CP+)	1ª CP diminui
Cultura (1ª CP+, 2ª CP+)	Solo (1ª CP+, 2ª CP-)	2ª CP diminui
Solo (1ª CP+, 2ª CP-)	Cultura (1ª CP+, 2ª CP+)	2ª CP aumenta
Solo (1ª CP+, 2ª CP-)	Cicatriz de queimada / água (1ª CP-, 2ª CP-)	1ª CP diminui
Cicatriz de queimada / água (1ª CP-, 2ª CP-)	Fitomassa densa (1ª CP-, 2ª CP+)	2ª CP aumenta
Cicatriz de queimada / água (1ª CP-, 2ª CP-)	Solo (1ª CP+, 2ª CP-)	1ª CP aumenta

Algumas variações se devem também a questões de deterioração radiométrica, isto é, a diferenças no desempenho radiométrico dos sensores ao longo do tempo, entre as bandas ou detectores. Os coeficientes de calibração usados na transformação dos números digitais para valores de reflectância podem estar defasados para as imagens atuais, e não são específicos para esta região de estudo.

O resultado pode ficar comprometido dada a dificuldade de normalizar informações oriundas de sensores com resoluções espectrais diferentes.

Quando os procedimentos de normalização não são realizados, a definição das direções de mudanças fica comprometida, dado que são avaliadas diretamente as informações de *brightness* e *greenness*.

Uma causa importante de certas ambiguidades na análise multitemporal aplicada ao estudo de mudanças no uso da terra é a definição da legenda. Isso é importante, pois há dois elementos fundamentais que participam da atribuição de uma determinada classe de legenda a uma porção do terreno: o analista e o sensor. O primeiro elemento é o intérprete ou analista, que, com base numa legenda definida, atribui uma porção do terreno a uma determinada classe. Neste caso, por exemplo, uma cultura em estágio inicial de desenvolvimento pode estar na mesma classe “agricultura” que uma cultura em pleno desenvolvimento ou mesmo em estágios finais de senescência. Porém, o segundo elemento, que é o sensor propriamente dito, receberá diferentes níveis de radiância multiespectral próprios de cada uma daquelas fases de desenvolvimento da cultura. Com isso, embora a classe de uso do solo “agricultura” não se altere durante o período analisado a partir da perspectiva do analista, ela sofre sensíveis mudanças radiométricas multiespectrais a partir da perspectiva do sensor ou produto de sensoriamento remoto.

A dificuldade analítica amplia-se ao considerar que o calendário biofísico natural e o manejo agrícola intra e entre anos é variável, somado à não-coincidência das datas de aquisição interperíodos dos produtos de sensoriamento remoto. Portanto, as análises de mudança do uso da terra por meio de sensoriamento remoto, particularmente quando se tratar de áreas extensivas e períodos longos, necessitam de aprofundamento tanto em termos de desenvolvimento de novas técnicas de análise multitemporal como de entendimento da dinâmica natural e antrópica para a construção das classes de legenda.

4.6 Alterações no Município de Chapadão do Céu

A análise visual das imagens mostra que a atividade agrícola no Município de Chapadão do Céu teve origem no final da década de 1970. As imagens atuais não assinalam manchas de vegetação natural contíguas, ou seja, é pouco provável que haja áreas destinadas à reserva legal e de preservação permanente. Neste último caso, seria considerada apenas a vegetação às margens dos rios, visto que não há áreas de alto declive na região. A Figura 4.16 mostra as variações na proporção das classes de mudanças do uso do solo ao longo do tempo.

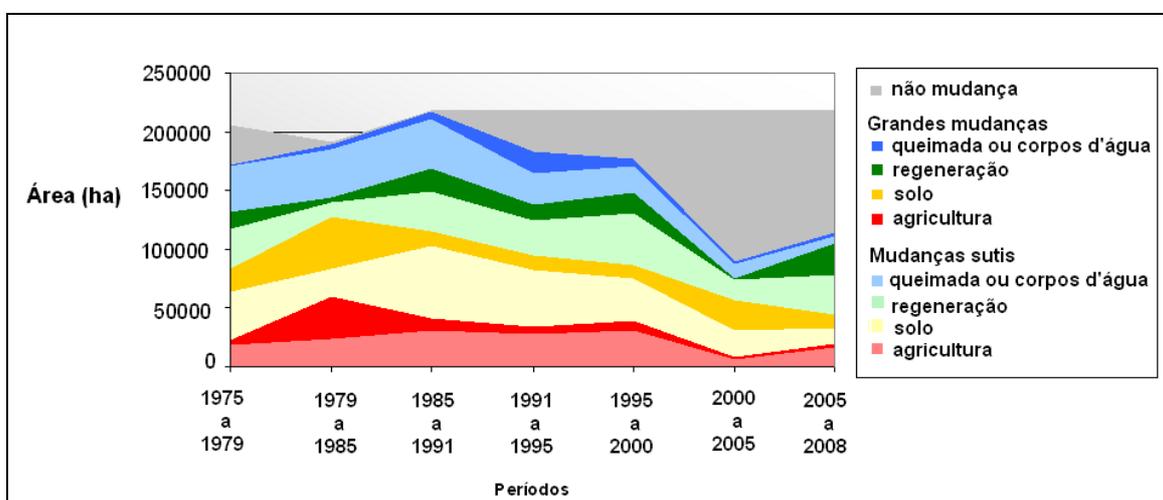


Figura 4.16 - Mudanças de uso do solo no Município de Chapadão do Céu (1975-2008)

Considerando os resultados da validação da Análise por Vetores de Mudanças e a época do ano em que as cenas foram adquiridas, é possível verificar um incremento mais acentuado da área agrícola no final da década de 1970. As porções do gráfico que se referem às áreas de solo podem estar associadas tanto à superfície destinada ao plantio agrícola quanto a extensões de campo limpo. Supondo que estas constituam ambientes mais estáveis, ou seja, com ciclo fenológico pouco variável, as áreas de solo podem identificar indiretamente áreas preparadas para plantio. Dado que as cenas utilizadas foram adquiridas após a colheita das principais culturas (soja e milho),

presume-se que o acréscimo de áreas destinadas à agricultura seja ainda maior.

A atividade agrícola em Chapadão do Céu alcançou seu pico de expansão no início da década de 2000, e já ocupa quase todo o território do Município, o que explica o aumento de áreas identificadas como “não-mudança”. O aumento no final do período de análise se deve às diferenças sazonais do ciclo fenológico das colheitas, visto que a cena de 2008 foi adquirida no início da colheita da soja, início do plantio do milho safrinha.

5. CONCLUSÕES

De forma conclusiva, é possível afirmar que as componentes de brilho e verdor são eficientes como dados de entrada para a Análise por Vetores de Mudanças em séries temporais longas. Considerando os resultados obtidos, o método empregado mostrou-se razoável na identificação de alterações de uso do solo, com desempenho superior a uma classificação aleatória, conforme a análise estatística utilizada. A Análise por Vetores de Mudanças pode ser bastante útil na detecção de mudanças no sentido de permitir o uso de parâmetros diversos e a variação destes ao longo do tempo. Como dados de entrada, as Componentes Principais são meios diretos e rápidos para a geração de informações de brilho e verdor de uma determinada cena. Ao contrário das imagens-fração derivadas do *Tasseled Cap*, as componentes principais não resultam do uso de coeficientes específicos para um sensor ou região do globo. São, portanto, viáveis em trabalhos que envolvam a análise da variação desses parâmetros. Estudos de variação da fitomassa para vegetação nativa ou culturas agrícolas e de desmatamento são alguns exemplos de aplicações.

A aplicação de dados multissensores para a detecção de mudanças ao longo do tempo mostrou-se tão eficiente para o método avaliado quanto a combinação de dados de um mesmo sensor. A comparação de um maior número de períodos, mesmo que para intervalos menores, de modo que fosse possível analisar os resultados estatisticamente, forneceria informações mais consistentes a esse respeito.

O estado atual de preservação do bioma Cerrado no Município de Chapadão do Céu mostra que houve domínio da atividade agrícola, em detrimento da manutenção de áreas protegidas, como as áreas de reserva legal e de preservação permanente. Atualmente, o crescimento agrícola, em termos de aumento de área cultivada, está estabilizado. O respeito à legislação referente às áreas protegidas é um elemento primordial para modificação da atual condição do bioma cerrado. Seria aceitável considerar a recomposição da

vegetação nativa a partir do estabelecimento de corredores ecológicos de vegetação ripária, além da adoção de políticas que incentivem o estabelecimento de espaços destinados à reserva legal em cada propriedade. Esta situação reforça a importância da manutenção de Unidades de Conservação de proteção integral nesta região, visto que o Município está inserido em área core de Cerrado.

Propõe-se para pesquisas futuras, a avaliação da eficácia das componentes principais como dados de entrada para a Análise por Vetores de Mudanças em outros biomas mais homogêneos, em que não haja tanta confusão entre as classes de uso do solo, tais como pastagens e campo sujo. Ou ainda, para a identificação de desmatamento ou outras alterações que não envolvam a transição de vegetação nativa para vegetação antrópica, sejam estas culturas ou florestas plantadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERBEROGLU, S.; AKIN, A. Assessing different remote sensing techniques to detect land use / cover changes in the eastern Mediterranean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.11, p.46-53, 2009.

BRASIL. Código Florestal Brasileiro Lei Nº 4.771, de 15 de Setembro de 1965. Institui o Novo Código Florestal. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, 16 de setembro de 1965.

BROWN, J.C.; KOEPPE, M.; COLES, B.; PRICE, K.P. Soybean and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: The case of Vilhena, Rondônia. **Ambio**, v.34, n.6, p.462-469, 2005.

BYRNE, C.F.; CRAPPER, P.F.; MAYO, K.K. Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, v.10, p.175-184, 1980.

CALLAHAN, K.E. **Validation of a radiometric normalization procedure for satellite derived imagery within a change detection framework**. 2003. 70 p. Thesis (Master in Geography) – Utah State University, Logan, Utah, 2003.

Disponível em:

<<http://www.gis.usu.edu/~doug/Grads/KarinCallahan/Thesis.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2008.

CAKIR, H.I.; KHORRAM, S.; NELSON, S.A.C. Correspondence analysis for detecting land cover change. **Remote Sensing of Environment**, v.102, p.306-317, 2006.

CAVALCANTI, R.B.; JOLY, C.A. Biodiversity and conservation priorities in the Cerrado region. In: OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J. (Org.) **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. pp. 351-367.

CENTENO, J.A.S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná, 2004. 209 p.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.

CHAVEZ, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, n.3, p.459- 79, 1988.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www2.conab.gov.br/download/sureg/go/Agr%C3%ADcola_CO.pdf >. Acesso em: 01 fev. 2008.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, 1991.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1998. 137 p.

COUTINHO, L.M. O conceito de Cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, v.1, p.17-23, 1978.

CRIST, E.P.; CICONE, R.C. A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM tasseled cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.GE-22, n.3, p.256-263, 1984.

DALL'AGNOL, A.; ROESSING, A.C.; LAZZAROTTO, J.J.; HIRAKURI, M.H.; OLIVEIRA, A.B. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Londrina: EMBRAPA, 2007. 12 p. Disponível em <http://www.cnpso.embrapa.br/download/pdf/circ43.pdf> . Acesso em 15 fev 2008.

DARYAIE, J. **Digital change detection using multi-scale wavelet transformation and neural network**. 2003. 57 p. Tese (Science in Geoinformatics). International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands, 2003. Disponível em: http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/daryaie.pdf . Acesso em: 18 fev. 2008.

DENG, J.S.; WANG, K.; JUN, L. ; DENG, Y.H. Urban land use change detection using multisensor satellite images. **Pedosphere**, v.19, n.1, p.96-103, 2009.

DIALLO, Y.; HU, G.; WEN, X. Applications of remote sensing in land use / land cover change detection in Puer and Simao Counties, Yunnan Province. **Journal of American Science**, v.5, n.4, p.157-166, 2009.

DIAS, B.F.S. Conservação da natureza no Cerrado brasileiro. In: PINTO, M.N. (Org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1990. p.583-640.

EASTMAN, J.R.; FULK, M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n.6, p.991-996, 1993.

EMBRAPA SOJA. Disponível em <http://www.cnpso.embrapa.br/> . Acesso em 01 jan. 2008.

FERREIRA, M.E.; FERREIRA JR., L.G.; FERREIRA, N.C.; NEMAYER, M. Desmatamentos no bioma Cerrado: uma análise multitemporal (2001/2005) com base nos dados MODIS – MOD13Q1. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.3877-3883. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.21.21/doc/3877-3883.pdf>>. Acesso em 01 dez. 2008.

FUNG, T.; LEDREW, E. Application of principal components analysis to change detection. **Photogrammetric Engineering of Remote Sensing**, v.53, n.12, p.1649-1658, 1987.

FURLEY, P.A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian Cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v.8, p.223-241, 1999.

GEOCOVER. Disponível em: <<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>> . Acesso em: 26 jan. 2008.

GLERIANI, J.M.; ANTUNES, M.A.H.; EPIPHANIO, J.C.N. Coeficientes da transformação espectral tasseled cap para uma cena com predomínio de latossolo roxo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.101-107.

Disponível em:

<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.17.23.25.56/doc/01_353.pdf> . Acesso em: 14 nov. 2008.

HIROSAWA, Y.; MARSH, S.E.; KLIMAN, D.H. Application of standardized principal component analysis to land-cover characterization using multitemporal AVHRR. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p.267-281, 1996.

HOUGHTON, R.A. The worldwide extent of land-use change. **Bioscience**, v.44, p.305-315, 1994.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.

Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br.htm>> Acesso em: 01 jan. 2009.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Plano de Manejo do PNE/GO-MS-MT**: Relatório Climático e Hidrológico. Brasília: IBAMA, 2004. Disponível em:

<www.ibama.gov.br/go/download.php?id_download=142> . Acesso em: 06 jan. 2009.

INGEBRITSEN, S.E.; LYON, R.I.P. Principal component analysis of multitemporal image pairs, **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.5, p.687-696, 1985.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing**: a remote sensing perspective. 3ª edição. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2005. 526 p.

JESUS, S.C.; MIURA, A.K. Análise espacial de fragmentos de Cerrado como subsídio para a seleção de áreas prioritárias para conservação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3943-3950. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.46/doc/3943-3950.pdf>> . Acesso em: 01 mai. 2009.

JOHNSON, R.D. Change vector analysis for disaster assessment: a case of study of hurricane Andrew. **Geocarto International**, v.9, n.1, p.41-45, 1994.

JOHNSON, R.D.; KASISCHKE, E.S. Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring of land cover and condition. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.3, p.411-426, 1998.

KAISER, M.F. Environmental changes, remote sensing, and infrastructure development: the case of Egypt's Port Said Harbour. Aceito pela revista **Applied Geography**. Acesso em 10 jan. 2009.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 1976, West Lafayette, Indiana. **Proceedings of...** West Lafayette: [s.n.], 1976. p.41-51.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v.1, n.1, 2005 p. 147-155.

LAMBIN, E.F.; STRAHLER, A.H. Indicators of land-cover change for Change Vector Analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.10, 2099–2119, 1994.

- LANDIS, J.R., KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, p.159–174, 1977.
- LASAPONARA, R. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT / VEGETATION NDVI temporal series. **Ecological Modelling**, v.194, p.429-434, 2006.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 4ª edição. New York, NY: John Wiley and Sons, 1999. 724 p.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.2, p.2365-2407, 2004.
- MACHADO, R.B.; RAMOS NETO, M.B.; PEREIRA, P.G.P., CALDAS, E.F.; GONÇALVES, D.A.; SANTOS, N.S.; TABOR, K.; STEININGER, M. **Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro**. Brasília: Conservation International do Brasil, 2004. 26 p. Disponível em <<http://www.conservation.org.br/arquivos/RelatDesmatamCerrado.pdf>> . Acesso em 01 set. 2008.
- MANTOVANI, J.E.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura vegetal através de dados TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p.1455-1466. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.11.10.57/doc/2_168p.pdf> . Acesso em: 02 jan. 2008.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-Satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**, n. 1, 1986. Disponível em <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/pdfs/L5_cal_document.pdf> . Acesso em 01 mai. 2008.

MAS, J. F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n.1, p.139-152, 1999.

MESQUITA, R.V.; FERREIRA, L.N.; FERREIRA, N.C.; FERREIRA, M.E. Discriminação sazonal de classes de cobertura da terra em Goiás a partir de imagens MODIS e índices de vegetação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.4045-4052. Disponível em: <
<http://martemarte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.21.09.57/doc/4045-4052.pdf>> . Acesso em: 01 ago. 2008.

MICHALEK, J. L.; LUCZKOVICH, J.J.; STOFFLE, R.W. Multispectral Change Vector Analysis for monitoring coastal marine environments. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n.3, p.381-384. 1993.

MITTERMEIER, R.A.; MYERS, N.; GIL, P.R.; MITTERMEIER, C. **Hotspots:** Earths biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Mexico City: CEMEX - Conservation International, 2000. 432 p.

MOREIRA, R.A.; RAMOS NETO, M.B.; MACHADO, C.P.; GONÇALVES, D.A.; SANTOS, N.S.; MENEZES, B.A.C; MACHADO, S.J.M.; FERREIRA, R.G. Análise temporal do uso do solo nos municípios do entorno do Parque Nacional das Emas com a utilização de imagens Landsat e CBERS-2. . In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiás. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 633-641. Disponível em: <
<http://martemarte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.01/doc/633.pdf> > . Acesso em: 01 abr. 2009.

MYERS, N.; MITTERMEYER, R.A.; MITTERMEYER, C.G.; FONSECA, G.A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v.403, p.853-858, 2000.

NASCIMENTO, M.A.L. Geomorfologia do Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**. v.12, n.1, p.1-22, 1992.

NEPSTAD, D.C.; KLINK, C.A.; UHL, C.; VIEIRA, I.C.; LEFEBVRE, P.; PEDLOWSKI, M.; MATRICARDI, E.; NEGREIROS, G.; BROWN, I.F.; AMARAL, E.; HOMMA, A.; WALKER, R. Land-use in Amazonia and the Cerrado of Brazil. **Ciência e Cultura**, v.49, p.73-86, 1997.

NIKOLAKOPOULOS, K.G.; VAIPOULOS, D.A.; SKIANIS, G.A. Use of multitemporal remote sensing data for mapping the Alfios river network changes from 1977 to 2000. **Geocarto International**, v.22, n.4. p.251-271, 2007.

PIWOWAR, J.M.; MILLWARD, A.A. Multitemporal change analysis of multispectral imagery using principal component analysis. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 1., 2002, Toronto, Canada. **Proceedings...** Toronto: [s.n.], 2002. p. 1851-1853. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7969/22038/01026276.pdf> . Acesso em: 01 fev. 2008.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Silva Vieira Editora, 2007. 135 p.

PONZONI, F.J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R.A.C. Calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiás. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1067-1074. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.09.15.05/doc/1067.pdf> > . Acesso em: 01 abr. 2008.

RESENDE, M.; KER, J.C.; BAHIA FILHO, A.F.C. Desenvolvimento sustentado do Cerrado. In: Alvarez V.; V.H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M.P.F. (Eds.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: UFV/SBCS, 1996. p.169-199.

RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. New York: Springer – Verlag, 1993. 340 p.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, n.2, p.223-227, 1986.

SANO, E.E.; FERREIRA, L.G. Monitoramento semidetalhado (escala 1:250000) de ocupação de solos do Cerrado: considerações e proposta metodológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p.3309-3316. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.09.12.11/doc/3309.pdf> . Acesso em: 15 dez. 2007.

SANO, E.E.; DAMBRÓS, L.A.; OLIVEIRA G.C.; BRITES, R.S. Padrões de cobertura de solos do Estado de Goiás. In: FERREIRA JR., L.G. **Conservação da biodiversidade e sustentabilidade ambiental em Goiás: Prioridades, Estratégias e Perspectivas**. Goiânia: LAPIG/UFG, 2006. Disponível em: <http://www.lapig.iesa.ufg.br/lapig/downloads/Livros/Livro_PDF/capitulo_3.pdf>. Acesso em: 01 jan.2009.

SCHOPPMANN, M. W.; TYLER, W.A. Chernobyl revisited: monitoring change with Change Vector Analysis. **Geocarto International**. v.11, n.1, p.13-27, 1996.

SILVA, P.G. **Detecção de mudanças em áreas de florestas tropicais sob exploração madeireira através da técnica de análise do vetor de mudança**. 2004. 122 p. (INPE -11581-TDI/961). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/pgsere/Silva-P-G-2003/publicacao.pdf>> . Acesso em: 21 out. 2008.

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data **International Journal of Remote Sensing**, v.10, n.6, p.989-1003, 1989.

SINGH, A.; HARRISON, A. Standartized Principal Components. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.6, p.883-896, 1985.

SIWE, R.N.; KOCH, B. Change vector analysis to categorize land cover change processes using the tasseled cap as biophysical indicator. **Environment Monitoring Assessment**, v.145, p.227-235, 2008.

TEILLET, P.M.; BARKER, J.L.; MARKHAM, B.L.; IRISH, R.R.; FEDOSEJEVS, G.; STOREY, J.C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. **Remote Sensing of Environment**, v.78, n.1-2, p.39-54, 2001.

VERMOTE, E.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J.L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, p.675-686, 1997.

VIEIRA, N.M. **Caracterização da cadeia produtiva da soja em Goiás**. 2002. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2002. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PEPS2658.pdf>> . Acesso em: 21 jul. 2008.

YUAN, F.; SAWAYA, K. E.; LOEFFELHOLZ, B. C.; BAUER, M. E. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.98, p.317-328, 2005.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DAS IMAGENS DE RADIÂNCIA E REFLECTÂNCIA APARENTE

{

Image Im1, Im2, Im3, Im4, Im5, Im6 ("Originais");
Image Im13, Im14, Im15, Im16, Im17, Im18 ("Rapar_1995");
Digital Im7, Im8, Im9, Im10, Im11, Im12 ("GrRapar_1995");

Im1=Recupere (Nome="1995_1");
Im2=Recupere (Nome="1995_2");
Im3=Recupere (Nome="1995_3");
Im4=Recupere (Nome="1995_4");
Im5=Recupere (Nome="1995_5");
Im6=Recupere (Nome="1995_6");

Im7=Novo (Nome="Gr1", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im8=Novo (Nome="Gr2", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im9=Novo (Nome="Gr3", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im10=Novo (Nome="Gr4", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im11=Novo (Nome="Gr5", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);
Im12=Novo (Nome="Gr7", ResX=28.5, ResY=28.5, Escala=50000, Min=0, Max=255);

Im13=Novo (Nome="Ra1", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);
Im14=Novo (Nome="Ra2", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);
Im15=Novo (Nome="Ra3", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);
Im16=Novo (Nome="Ra4", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);
Im17=Novo (Nome="Ra5", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);
Im18=Novo (Nome="Ra7", ResX=28.5, ResY=28.5, Nbits=8);

elev=37.67/57.2957795130;
zen=90/57.2957795130 - elev;
pi=3.141592654;
dmax=255;
dist=0.9873;

Lmin1=-0.152;
Lmin2=-0.284;
Lmin3=-0.117;
Lmin4=-0.151;
Lmin5=-0.037;
Lmin7=-0.015;
Lmax1=19.30;
Lmax2=36.50;
Lmax3=26.40;
Lmax4=22.10;
Lmax5=3.02;

Lmax7=1.65;

esun1=195.2;

esun2=182.7;

esun3=155.0;

esun4=104.0;

esun5=22.07;

esun7=7.49;

Im7= (((Lmin1+(Lmax1-Lmin1)*(Digital (Im1/dmax))))*pi*dist^2)/(esun1*cos(zen)))^255;

Im7= Im7 <= 0 ? 0 : Im7;

Im13= Imagem (Im7);

Im8= (((Lmin2+(Lmax2-Lmin2)*(Digital (Im2/dmax))))*pi*dist^2)/(esun2*cos(zen)))^255;

Im8= Im8 <= 0 ? 0 : Im8;

Im14= Imagem (Im8);

Im9= (((Lmin3+(Lmax3-Lmin3)*(Digital (Im3/dmax))))*pi*dist^2)/(esun3*cos(zen)))^255;

Im9= Im9 <= 0 ? 0 : Im9;

Im15= Imagem (Im9);

Im10= (((Lmin4+(Lmax4-Lmin4)*(Digital (Im4/dmax))))*pi*dist^2)/(esun4*cos(zen)))^255;

Im10= Im10 <= 0 ? 0 : Im10;

Im16= Imagem (Im10);

Im11= (((Lmin5+(Lmax5-Lmin5)*(Digital (Im5/dmax))))*pi*dist^2)/(esun5*cos(zen)))^255;

Im11= Im11 <= 0 ? 0 : Im11;

Im17= Imagem (Im11);

Im12= (((Lmin7+(Lmax7-Lmin7)*(Digital (Im6/dmax))))*pi*dist^2)/(esun7*cos(zen)))^255;

Im12= Im12 <= 0 ? 0 : Im12;

Im18= Imagem (Im12);

}

APÊNDICE B - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DA MAGNITUDE DOS VETORES DE MUDANÇA

```
{  
  
Numerico GR91, BR91 ("BRGR");  
Numerico GR95, BR95 ("BRGR");  
Numerico Mag, Dir ("grade_magnitude");  
  
GR91=Recupere (Nome = "cor_GR_1991");  
BR91=Recupere (Nome = "cor_BR_1991");  
GR95=Recupere (Nome = "cor_GR_1995");  
BR95=Recupere (Nome = "cor_BR_1995");  
  
Mag=Novo (Nome = "cor_magnitude91/95", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min = 0, Max = 255);  
  
Mag=sqrt ((GR95 - GR91)^2 + (BR95 -BR91)^2);  
  
}
```


APÊNDICE C - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CÁLCULO DA DIREÇÃO DOS VETORES DE MUDANÇA

```
{  
Numerico GR91, BR91 ("BRGR");  
Numerico GR95, BR95 ("BRGR");  
  
Numerico Dir ("grade_vetor");  
  
GR91=Recupere (Nome = "cor_GR_1991");  
BR91=Recupere (Nome = "cor_BR_1991");  
GR95=Recupere (Nome = "cor_GR_1995");  
BR95=Recupere (Nome = "cor_BR_1995");  
  
Dir=Novo (Nome = "cor_vetor9195", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min = 0, Max = 6.285714286);  
  
Dir = (BR95-BR91)>0 ? atan((GR95-GR91)/(BR95-BR91)) :  
      (BR95-BR91)<0 && (GR95-GR91)>=0 ? atan((GR95-GR91)/( BR95-BR91))+3.141592654 :  
      (BR95-BR91)<0 && (GR95-GR91)<0 ? atan((GR95-GR91)/( BR95-BR91))+(-3.141592654)  
:  
  Dir ;  
}
```


APÊNDICE D - PROGRAMAÇÃO EM LEGAL PARA O CRUZAMENTO DE PLANOS DE INFORMAÇÃO (MAPA TEMÁTICO DE CLASSES DE MUDANÇAS E IMAGEM DE MAGNITUDE DE MUDANÇAS)

```
{
Imagem mag ("ima_magnitude");
Tematico vet ("fat_vetor");
Tematico cross ("mag_vet");

mag=Recupere (Nome = "9195");
vet=Recupere (Nome = "fatvet_9195");
cross=Novo (Nome = "changes9195", ResX=30, ResY=30, Escala=50000);

cross= Atribua
{

"nochange1":(vet.Classe == "C1" && (mag>=0 && mag<=19)),
"nochange2":(vet.Classe == "C2" && (mag>=0 && mag<=19)),
"nochange3":(vet.Classe == "C3" && (mag>=0 && mag<=19)),
"nochange4":(vet.Classe == "C4" && (mag>=0 && mag<=19)),
"suave_queimada":(vet.Classe == "C1" && (mag > 19 && mag <= 39)),
"grande_queimada":(vet.Classe == "C1" && (mag > 39 && mag <= 255)),
"suave_desmat":(vet.Classe == "C2" && (mag > 19 && mag <= 39)),
"grande_desmat":(vet.Classe == "C2" && (mag > 39 && mag <= 255)),
"suave_cultura":(vet.Classe == "C3" && (mag > 19 && mag <= 39)),
"grande_cultura":(vet.Classe == "C3" && (mag > 39 && mag <= 255)),
"suave_regeneracao":(vet.Classe == "C4" && (mag > 19 && mag <= 39)),
"grande_regeneracao":(vet.Classe == "C4" && (mag > 39 && mag <= 255))

};

}
```