



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/08.31.20.11-TDI

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
DIGITAIS PARA DETECÇÃO DE FEIÇÕES
ASSOCIADAS AO CORTE SELETIVO DE MADEIRA NA
AMAZÔNIA**

Nara Vidal Pantoja

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. João Viane Soares, e Dalton de Morisson Valeriano, aprovada
em 09 de setembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/386NR75>>

INPE
São José dos Campos
2010

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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

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

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

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2010/08.31.20.11-TDI

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
DIGITAIS PARA DETECÇÃO DE FEIÇÕES
ASSOCIADAS AO CORTE SELETIVO DE MADEIRA NA
AMAZÔNIA**

Nara Vidal Pantoja

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. João Viane Soares, e Dalton de Morisson Valeriano, aprovada
em 09 de setembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/386NR75> >

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P196t Pantoja, Nara Vidal.
Técnicas de processamento de imagens digitais para detecção de feições associadas ao corte seletivo de madeira na Amazônia / Nara Vidal Pantoja. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xxii+65 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/08.31.20.11-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. João Viane Soares, e Dalton de Morisson Valeriano.

1. Amazônia. 2. Corte seletivo. 3. Processamento digital de imagens (PDI). I.Título.

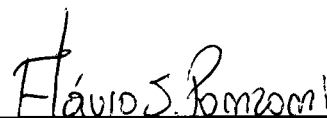
CDU 004.932

Copyright © 2010 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 © 2010 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.

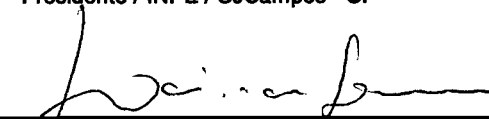
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. João Vianei Soares



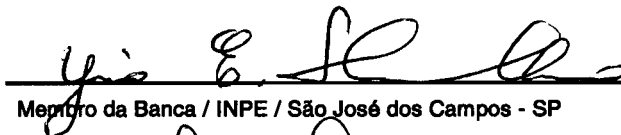
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Dalton de Morisson Valeriano



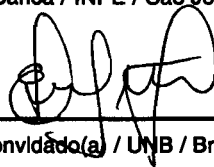
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Yosio Edemir Shlmabukuro



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi



Convidado(a) / UNB / Brasília - DF

Aluno (a): Nara Vidal Pantoja

São José dos Campos, 09 de setembro de 2010

Não fique tão ocupado ou viva tão apressadamente que você não possa ouvir a música do campo ou a sinfonia que glorifica a floresta.
(Dale Carnegie)

*A meus pais Braga e Nazaré, por todo amor e por sempre
me encorajarem a perseguir meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus sobre todas as coisas por abençoar minha vida e às várias pessoas e instituições que me ajudaram a chegar até aqui.

Ao INPE pela excelência do curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto e infraestrutura proporcionada. À Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) e à Divisão de Processamento de Imagens (DPI) pelo apoio necessário ao desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de pós-graduação no primeiro ano de mestrado, período em que foi possível cumprir as disciplinas e desenvolver a idéia deste trabalho.

Ao IBAMA, instituição a qual pertença, por todo entendimento e apoio na fase final do curso de mestrado.

Ao meu orientador Dr. Dalton de Morisson Valeriano, pela concepção deste trabalho, pelo incentivo e discussões. Por ter acreditado que esta pesquisa iria se concretizar, contribuindo com seu conhecimento e sua experiência, e principalmente com seu comprometimento na etapa final desta dissertação.

Ao Dr. João Viane Soares, pela sua orientação, por ter acreditado no meu potencial e por confiar em mim na realização desta pesquisa.

Ao Dr. João Roberto dos Santos, pela ajuda e atenção demonstrados no decorrer do mestrado e pelos momentos de descontração.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições e disposição em analisar este trabalho.

Ao meu orientador de graduação Dr. Foster Brown, pelos primeiros passos na pesquisa científica e por me motivar e encorajar a seguir em frente. Ao Dr. Wilfrid Schroeder pelos ensinamentos e convívio que antecederam a este mestrado e foram valiosos para minha conduta como aluna de pós-graduação.

Às secretárias Vera e Valéria pela ajuda durante o curso. À Etel Renó pelo apoio e descontração.

Ao Rogério Negri pela importante ajuda e paciência na formatação do trabalho.

Aos meus amigos do INPE e aos amigos da turma de 2008 pelos momentos alegres e difíceis compartilhados durante o período das disciplinas e durante o tempo em que morei em São José dos Campos. Em especial, Érika Saito, Emerson Servello, Fábio Fernandes, Izabel Reis, Maykon Novaes, Tiago Bernardes e Wagner Barreto.

À Vivian Renó pela amizade, incentivo, risadas e passeios. Agradeço também à Angela e Nilton, pela acolhida e hospitalidade.

A meus pais Braga e Nazaré, pessoas em que me inspiro pelo exemplo de fé, honestidade e esforço. À minha irmã Najara pelo apoio.

Especialmente, ao Anderson Peixoto, por todo o amor e espera, e sobretudo pela paciência e força constantes, apesar das longas distâncias geográficas envolvidas.

RESUMO

A exploração florestal tem afetado extensas áreas de florestas primárias na Amazônia brasileira. Esta atividade, quando praticada com base no manejo florestal, pode ser uma grande aliada no esforço para reduzir o desmatamento na região. O monitoramento florestal é fundamental para estabelecer planos de ação e estratégias que contribuam para o uso sustentável dos recursos naturais. Considerando a extensão da área sob exploração madeireira, a tecnologia de sensoriamento remoto orbital oferece meios para otimização do monitoramento. Neste contexto, este estudo realizado no norte do Mato Grosso analisou imagens de alta resolução espacial para caracterizar a geometria e o contraste radiométrico das feições mais conspícuas da atividade madeireira, que são os pátios de estocagem de madeira. Tamanho, forma dos pátios, distância entre eles e o contraste radiométrico entre pátios e a floresta em seu entorno foram caracterizados para fundamentar o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de alvos pontuais a partir de técnicas de processamento de imagens aplicadas a dados de resolução espacial média. Foi realizada uma análise exploratória das imagens de alta resolução HRC/CBERS-2B para descrever características radiométricas e geométricas de pátios de estocagem e para avaliar sua utilidade como verdade terrestre para estudos relacionados ao monitoramento da exploração madeireira. Investigou-se a aplicação de modelo linear de mistura espectral, NDVI e transformações por IHS e principais componentes em imagens TM/LANDSAT e CCD/CBERS para detectar atividade de corte seletivo de madeira e foi desenvolvido um método para detectar pátios baseando-se no contexto da vizinhança dos pátios. Os resultados mostraram que os pátios têm brilho medido pela HRC 57% maior do que a floresta e apresentaram área média de 380 m² distribuídos numa distância de em média 460 metros. Deste modo, em imagens de resolução de 20 a 30 metros (400 a 900 m²), os pátios se apresentam como objetos pontuais, o que justifica a proposição do uso de contexto de vizinhança para sua detecção. Foi definido limiar de decisão para definição do objeto "pátio" para cada imagem analisada e um algoritmo desenvolvido a partir da decisão de um "pátio" como um pixel de valor acima ou abaixo do limiar envolto de pixels com média abaixo ou acima deste limiar, dependendo da imagem analisada. A comparação das imagens antes e após a aplicação da metodologia proposta permitiu identificar áreas com ocorrência de exploração madeireira evidenciada a partir do realce de pátios de estocagem. Na análise de exatidão baseada na verdade terrestre derivada dos dados HRC 54% a 75% foram corretamente identificados pelas diferentes técnicas.

TECHNIQUES OF DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR DETECTION OF FEATURES ASSOCIATED WITH SELECTIVE LOGGING IN THE AMAZONIA

ABSTRACT

Extensive areas of primary forest have been impacted by logging in the Brazilian Amazon Region. This activity, when conducted based on forest management, may be a great aid in the effort to reduce regional deforestation. Forest monitoring is fundamental for the establishment of action plans and strategies that contribute to the sustainable use of natural resources. Considering the extension of the area under timber extraction, remote sensing technology provides means for the optimization of the monitoring activity. In this context, this study conducted in northern Mato Grosso aims at the analysis of high resolution spacial images to characterize the geometry and radiometric contrast of the most conspicuous feature of the logging activity which are the waiting sites. Size, form of the waiting sites, the distance among them and the radiometric contrast between the sites and the surrounding forest were characterized in order to base the development of a target detection algorithm through image processing techniques applied to medium resolution data. An exploratory analysis of high resolution HRC/CBERS-2B images was conducted to characterize radiometrically and geometrically the waiting sites and to evaluate its utility as a source of ground truth for studies related to logging monitoring. It was investigated the application of linear mixing model, NDVI and IHS and principal components transformations to Landsat and CCD/CBERS images for the detection of selective logging activity and a method to detect waiting sites was developed based on the context of the vicinity of these sites. The results showed that the waiting sites have HRC brightness values 57 percent higher than the surrounding forest, they present in average area of 380 m² and are distributed at the average distance of 460 m. As such, in 20 to 30 m resolution images (400 - 900 m²) the waiting sites are point objects which justifies the proposal of the used of vicinity context for their detection. A threshold for the decision of a "waiting site" object was defined for each image and an algorithm was developed based on the decision of a "waiting site" as a pixel with values above or below the threshold surrounded by pixels with average below or above the threshold, depending on the analyzed image. The comparison of the images before and after the application of the proposed methodology allowed the identification of areas with of logging activity by the enhancement of the waiting sites. In the accuracy assessment based on ground truth derived from the HRC data 54% to 75% were correctly identified by the different techniques.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Fluxograma da dissertação.	4
2.1 Zonas e pólos madeireiros na Amazônia Legal em 2009. Fonte: (SFB; IMAZON, 2010).	8
2.2 Destino da madeira processada na Amazônia Legal em 1998, 2008 e 2009. Fonte: (SFB; IMAZON, 2010).	8
2.3 Esquema da disposição da exploração convencional e manejada. Fonte: Adaptado de Silva (2004).	9
2.4 Imagens fração solo (círculo vermelho), vegetação (círculo verde) e sombra (círculo azul), derivadas do MLME. Fonte: (GRAÇA, 2004).	15
2.5 Exemplos de trabalhos realizados para detectar corte seletivo e suas respectivas metodologias.	19
3.1 Localização da área de estudo e grade de cobertura das imagens HRC/CBERS utilizadas no estudo.	23
3.2 Perfil de distribuição do brilho na imagem HRC/CBERS-2B em áreas de transição entre pátio e floresta.	26
3.3 Exemplo de dimensão de pátio e distância entre pátios.	28
3.4 Identificação de pátios (vermelho) a partir da interpretação visual nas imagens HRC/CBERS-2B.	28
3.5 Imagem HRC/CBERS-2B e imagem classificada.	29
4.1 Exemplo esquemático do modelo de detecção do corte seletivo usando imagem TM/LANDSAT.	32
4.2 Localização das áreas de estudo e respectivos municípios abrangidos (imagem TM/LANDSAT, órbita ponto 226/068, de 19/08/2008, composição RGB-543).	33
4.3 Limiar entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo/vegetação.	39
4.4 Limiar entre pátio e vizinhança na imagem principal componente 1.	40
4.5 Limiar entre pátio e vizinhança na imagem NDVI.	41
4.6 Limiar entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo.	41
4.7 Limiar entre pátio e vizinhança na imagem componente intensidade.	42
4.8 Imagem fração solo, fração vegetação e imagem razão solo/vegetação, respectivamente para as imagens TM/LANDSAT (à esquerda) e CCD/CBERS (à direita)	44
4.9 Áreas sob exploração seletiva de madeira.	45
4.10 Imagem fração solo/vegetação e imagem detecção de pátio derivada da fração solo/vegetação.	46
4.11 Imagem PC 1 e imagem detecção de pátio derivada da PC 1.	46
4.12 Imagem NDVI e imagem detecção de pátio derivada do NDVI.	46
4.13 Imagem fração solo e imagem detecção de pátio derivada da fração solo.	47

4.14	Imagem componente intensidade e imagem detecção de pátio derivada da componente intensidade.	47
4.15	Imagem detecção de pátios baseado na fração solo/vegetação (a), fração solo (b), PC1 (c), NDVI (d) e Intensidade (e) com máscara do PRODES e detalhe (em vermelho) de áreas de ocorrência de pátios.	50
4.16	Resultado da classificação temática baseada na imagem razão da fração solo/vegetação.	51
4.17	Classificação temática baseada na imagem componente principal 1. . . .	52
4.18	Classificação temática baseada na imagem NDVI.	53
4.19	Classificação temática baseada na imagem fração solo.	54
4.20	Classificação temática baseada na imagem componente intensidade. . . .	55

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Número de empresas, consumo de consumo de toras, produção processada, empregos e receita bruta da atividade madeireira na Amazônia Legal em 2009.	7
3.1 Imagens HRC/CBERS utilizadas na pesquisa.	24
3.2 Características principais da câmera HRC/CBERS.	24
3.3 Dimensão dos pátios mapeada a partir da imagem classificada.	27
3.4 Distância entre pátios mapeada a partir da imagem classificada.	27
4.1 Imagens TM/LANDSAT, CCD/CBERS e HRC/CBERS utilizadas na pesquisa.	34
4.2 Avaliação da detecção de pátios.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBERS	–	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD	–	Câmera Imageadora de Alta Resolução
HRC	–	Câmera Pancromática de Alta Resolução
PANMUX	–	Câmera PanMux
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SFB	–	Serviço Florestal Brasileiro
IMAZON	–	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
LANDSAT	–	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
TM	–	<i>Thematic Mapper</i>
PRODES	–	Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia
DETER	–	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
DEGRAD	–	Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira
SAD	–	Sistema de Alerta de Desmatamento
CLAS	–	Sistema de Análise Landsat da Carnegie
DMC	–	Diâmetro Mínimo de Corte
DAP	–	Diâmetro à Altura do Peito
GEE	–	Gases de Efeito Estufa
REDD	–	Redução de Emissões de Desmatamento e Degradação
AHP	–	Processo Analítico Hierárquico
NDFI	–	Índice da Diferença Normalizada de Frações
ND	–	Nível Digital
DOS	–	Subtração do Objeto Escuro
TPC	–	Transformação por Componentes Principais
IHS	–	Intensidade Matiz Saturação
NDVI	–	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ND	–	Nível Digital
LEGAL	–	Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico
SIG	–	Sistema de Informações Geográficas
MLME	–	Modelo Linear de Mistura Espectral
PDI	–	Processamento Digital de Imagens
SPRING	–	Sistema de Processamento de Informações Geográficas
AAO	–	Análise Orientada a Objeto
SMA	–	Análise Espectral de Mistura
NVP	–	Vegetação Não-Fotossintética

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Hipótese, objetivos e contribuição da pesquisa	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Importância da atividade madeireira na Amazônia e no Brasil	5
2.2 Impacto da atividade madeireira na Amazônia	5
2.3 Sistemas de exploração madeireira: manejo x desmatamento	9
2.4 Sensoriamento remoto da exploração madeireira	11
2.4.1 Detecção e mapeamento da exploração madeireira por satélite	12
2.5 Sistemas de monitoramento em operação na Amazônia	17
3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO USO DE DADOS DA CÂMERA HRC/CBERS-2B PARA ESTUDOS EM ÁREAS DE EXPLORAÇÃO MADEIREIRA POR CORTE SELETIVO	21
3.1 Introdução	21
3.2 Materiais e Métodos	22
3.2.1 Área de estudo	22
3.2.2 Dados de sensoriamento remoto	23
3.2.3 Recursos computacionais	24
3.2.4 Registro de imagens	24
3.2.5 Teste de classificação floresta e não-floresta	25
3.2.6 Extração de informações sobre pátios de estocagem	25
3.2.7 Características radiométricas e geométricas das feições	25
3.2.8 Preparação de verdade terrestre	25
3.3 Resultados e Discussões	25
3.3.1 Características radiométricas e geométricas das feições	25
3.3.2 Análise quantitativa dos pátios: área e contraste na borda	26
3.3.3 Mapeamento de pátios e estradas	28
3.3.4 Conclusão	29
4 ANÁLISE DE DADOS TM/LANDSAT E CCD/CBERS PARA DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE DETECÇÃO DE FEIÇÕES RELACIONADAS AO CORTE SELETIVO	31
4.1 Introdução	31
4.1.1 Abordagem adotada	32
4.2 Materiais e Métodos	33
4.2.1 Área de estudo	33

4.2.2	Dados de sensoriamento remoto	34
4.2.3	Pré-processamento das imagens	34
4.2.4	Técnicas de Processamento Digital de Imagens	35
4.2.4.1	Modelo Linear de Mistura Espectral	35
4.2.4.2	Razão entre imagens fração solo e vegetação	36
4.2.4.3	Transformação por Componentes Principais	37
4.2.4.4	Transformação IHS	37
4.2.4.5	Índice de Vegetação	38
4.2.5	Concepção do método de detecção de pátios	38
4.2.5.1	Análise da distribuição do nível digital de pátios e vizinhança	38
4.2.5.2	Comparação com verdade terrestre	43
4.3	Resultados e Discussão	43
4.3.1	Operação aritmética entre bandas	43
4.3.2	Análise Qualitativa	44
4.3.3	Análise Quantitativa	48
4.3.4	Conclusão	49
5	CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A Amazônia Brasileira representa um terço das florestas tropicais do mundo e produz 75% da madeira em tora do Brasil (UHL et al., 2002). A atividade madeireira está entre as principais atividades econômicas da região, porém estima-se que 90% da madeira extraída são provenientes de áreas não manejadas de forma adequada (MMA,).

A exploração e o processamento industrial de madeira estão entre as principais atividades econômicas da Amazônia brasileira, juntamente com a mineração e a agropecuária (VERÍSSIMO et al., 2006). Em 2009 foram identificadas 2.226 empresas madeireiras em funcionamento na Amazônia Legal, que extraíram em torno de 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora nativa, o que equivale a 3,5 milhões de árvores ¹ (LENTINI et al., 2005); (SFB; IMAZON, 2010).

As práticas de manejo sustentável da exploração madeireira já estão regulamentadas na legislação ambiental brasileira. No entanto, ainda não foram bem sucedidas devido à grande oferta de madeira oriunda da expansão agrícola e por vezes, ausência ou impossibilidade de fiscalização em áreas de difícil acesso na Amazônia. A área explorada de forma ilegal está em torno de 10 a 20 mil quilômetros quadrados por ano (NEPSTAD et al., 1999); (ASNER et al., 2005).

As estimativas de áreas de florestas submetidas ao corte seletivo de madeira na Amazônia, quando somente árvores comerciais são extraídas, têm sido apresentadas com números controversos por diferentes autores (NEPSTAD et al., 1999), (SANTOS et al., 2001), com taxas alarmantes de 15 mil km² ano⁻¹ e mais conservadoras de 2 mil km² ano⁻¹, respectivamente.

Esta incerteza nas estimativas geradas mostra que o monitoramento da atividade madeireira é limitante para estabelecer planos de ação e estratégias que contribuam para o uso sustentável dos recursos florestais, ao identificar áreas afetadas pela exploração madeireira ilegal. Neste contexto, o uso de dados provenientes de sensoriamento remoto auxilia no monitoramento dessa atividade na Amazônia, principalmente devido sua dimensão territorial que impede a ampla fiscalização pelos órgãos ambientais.

Alguns estudos demonstram que é possível caracterizar e mapear a exploração madeireira na Amazônia utilizando imagens orbitais a partir da identificação de feições típicas da extração madeireira, como a distribuição de pátios de estocagem e redes de estradas (WATRIN; ROCHA, 1992); (STONE; LEFEBVRE,); (JÚNIOR; BARRETO,); (SANTOS et al., 2001); (MONTEIRO, 2005); (SILVA et al., 2003); (GRAÇA, 2004).

¹Considerando que cada árvore explorada tem em média 4 metros cúbicos de madeira em tora de valor comercial

A abordagem destes trabalhos leva em consideração a presença de indicativos de exploração madeireira, a partir da distinção da reflectância dos alvos com solo exposto (pátios e estradas) e sem solo exposto (floresta). Para isso, diversos autores utilizam interpretação visual (SANTOS et al., 2001) e aplicação de *buffers* (JÚNIOR; BARRETO,) ou técnicas de transformação de dados, como rotação radiométrica (GRAÇA, 2004); (MALDONADO et al., 2009), modelos de mistura (JÚNIOR et al.,); (ASNER et al., 2005) e índices de vegetação (MATRICARDI et al.,) para obter imagens resultantes com estes indicativos detectados. Já outros estudos exploram métodos que identificam feições pontuais dos pátios, como a análise de textura, imagem fração-solo e brilho (MATRICARDI, 2003), portanto baseiam-se numa informação contextual, uma vez que os pátios têm representação pontual nas imagens com 20 a 30 metros de resolução, enquanto as estradas apresentam feições lineares.

De todo modo, há a dificuldade de obter a verdade terrestre, pois a análise desta atividade requer dados de campo para serem usados na validação das estimativas de áreas exploradas.

A investigação de técnicas de sensoriamento remoto que realçam a característica principal da exploração madeireira por corte seletivo, pontos contrastantes de solo em meio à cobertura florestal, subsidia o uso desta ferramenta para compreender a dinâmica da atividade madeireira na Amazônia. As técnicas de processamento digital de imagens e o conhecimento de detecção de alvos podem ser abordados para explorar esta característica do corte seletivo. As imagens de alta resolução da câmara *High Resolution Camera* (HRC) do satélite CBERS-2B estão disponíveis para o período de 2007 a 2010 e estes dados representam um potencial como verdade terrestre.

Nesse contexto científico se insere o presente trabalho. Trata-se de analisar imagens de alta resolução para caracterizar a geometria dos pátios de estocagem de madeira (tamanho, forma e distância) e o contraste radiométrico entre pátios e a floresta, visando desenvolver um algoritmo de detecção de alvos pontuais a partir de técnicas de processamento de imagens de média resolução espacial.

Após essa breve contextualização que apresenta as principais questões abordadas nesta dissertação, as próximas seções apresentam a hipótese, os objetivos, a contribuição desta pesquisa e a organização do documento.

1.2 Hipótese, objetivos e contribuição da pesquisa

Tem-se como hipótese de trabalho que indicativos de atividade madeireira como a presença de pátios de estocagem e estradas de acesso às áreas de exploração madeireira são passíveis de detecção em imagens de média resolução espacial e imagens de alta resolução podem ser utilizadas como verdade terrestre.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método para detectar automati-

camente padrões de corte seletivo de madeira e investigar a eficiência de técnicas de processamento de imagens para identificar áreas sob exploração madeireira com apoio de dados de alta resolução. Deste modo, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Descrever padrões de exploração florestal em imagens de alta resolução HRC/CBERS-2B e verificar sua utilidade como verdade terrestre para estudos no campo florestal;
- b) Investigar técnicas de processamento de imagens TM/LANDSAT para detecção de feições relacionadas à exploração madeireira por corte seletivo.

Cientificamente, essa dissertação visa contribuir com técnicas para a automatização da detecção do corte seletivo de madeira, tendo em vista duas importantes considerações: (a) é essencial evitar a identificação manual de feições de corte seletivo nas imagens para tornar o processo de detecção mais eficiente e (b) fornecer uma técnica que possa ser aplicada nos sistemas de monitoramento da Amazônia, dando subsídios para minimização de tempo e orientação de fiscalização, facilitando a tomada de decisão no controle mais eficaz das áreas atingidas pela exploração madeireira.

1.3 Estrutura da dissertação

Inicialmente o capítulo 2 apresenta um referencial teórico com a finalidade de embasar a pesquisa realizada, em que são abordados conceitos relacionados à exploração madeireira convencional e ao manejo florestal na Amazônia. É apresentado um breve histórico do monitoramento da atividade madeireira por satélites e os atuais sistemas de monitoramento em operação.

O capítulo 3 discute o uso de imagens HRC/CBERS-2B para descrever características radiométricas e geométricas de pátios de estocagem a fim de verificar sua utilidade como verdade terrestre para estudos relacionados à exploração madeireira.

Em seguida, o capítulo 4 discute a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens TM/LANDSAT e CCD/CBERS para detectar corte seletivo de madeira, visando o desenvolvimento de um método de análise digital para monitorar atividade madeireira.

Por fim, capítulo 5 apresenta as conclusões gerais desta dissertação, contribuições, limitações e algumas sugestões para a continuidade dessa pesquisa.

O fluxograma resumindo o conteúdo metodológico desta dissertação é mostrado na Figura 1.1.

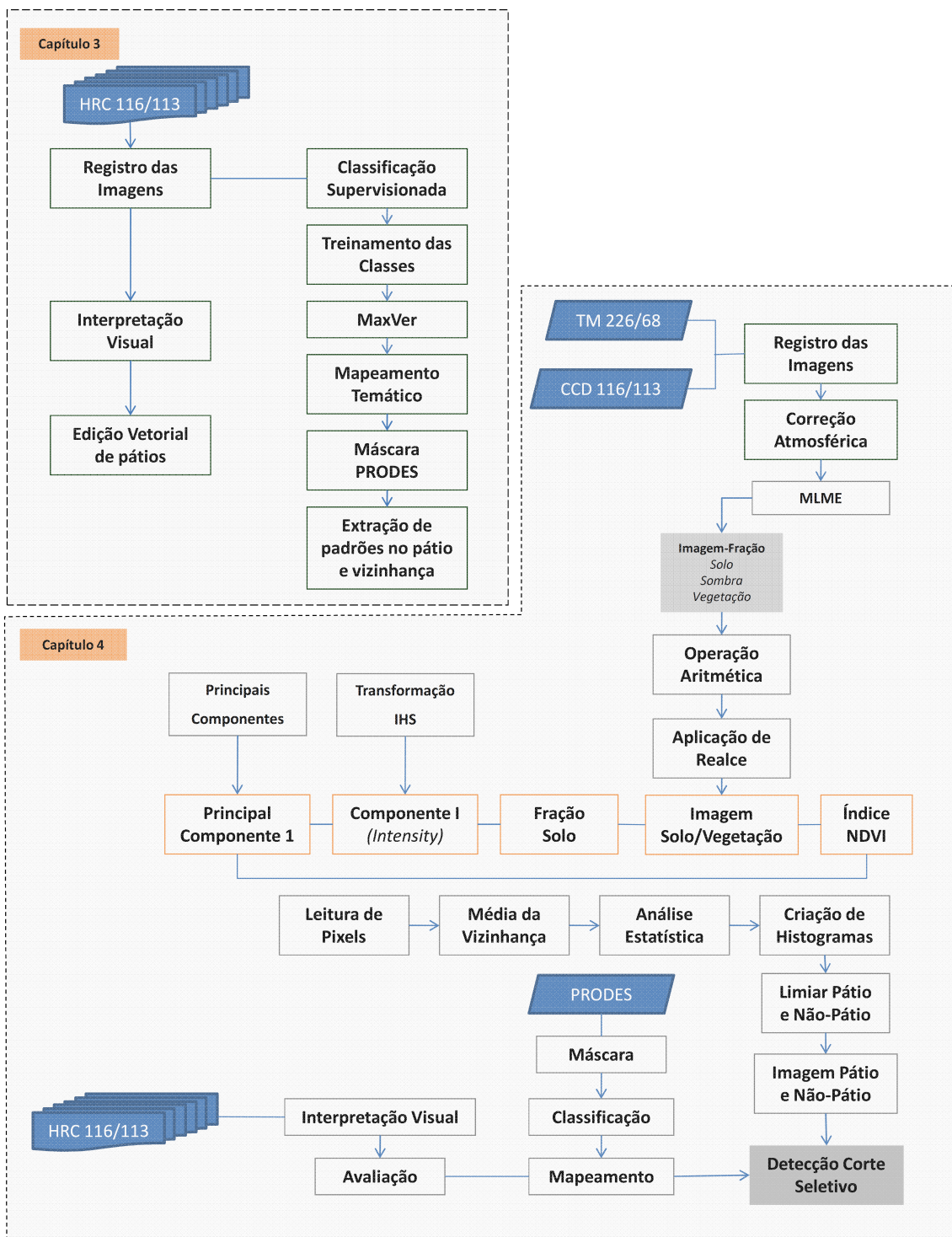


Figura 1.1 - Fluxograma da dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo são descritos os conceitos e a fundamentação teórica necessária para este trabalho. Inicialmente é descrita a importância da atividade madeireira, abordando os conceitos referentes à exploração madeireira e manejo florestal na Amazônia e o monitoramento desta atividade com o uso de imagens de satélites. São apresentados os principais sistemas de monitoramento da Amazônia, bem como os programas espaciais em funcionamento e a disponibilidade de imagens orbitais.

2.1 Importância da atividade madeireira na Amazônia e no Brasil

A atividade madeireira na Amazônia começou historicamente há cerca de 300 anos com a exploração de poucas espécies nas regiões de várzea, de modo que a intensidade explorada era baixa, pois se retirava poucos metros cúbicos de madeira por hectare (BARROS; UHL, 1995).

A partir da década de 1970, a atividade madeireira teve um impulso com a chegada de imigrantes para a região, vindo principalmente das regiões sul e sudeste do país, e também em virtude da exaustão de florestas tropicais de Mata Atlântica (LENTINI et al., 2003).

Por mais de três séculos, a atividade madeireira esteve restrita às florestas de várzea ao longo dos principais rios da Amazônia, mas com a construção de estradas e o esgotamento dos estoques madeireiros no sul do Brasil, a exploração madeireira tornou-se uma atividade de grande importância na região (UHL et al., 1997). Por exemplo, no período de 1976 a 1988, a produção total de madeira em tora dos Estados do Sul do Brasil diminuiu de 15 milhões de metros cúbicos para 7,9 milhões de metros cúbicos, ou seja, de 47% para 17% da produção total de madeira do Brasil (PRODUÇÃO...,). Durante o mesmo período, a produção de madeira em tora na Região Norte aumentou de 6,7 para 24,6 milhões de metros cúbicos (54% do total do Brasil).

Nas últimas décadas, o corte de espécies arbóreas de alto valor comercial tem se tornado uma importante atividade na Amazônia brasileira (STONE; LEFEBVRE,); (NEPSTAD et al., 1999). Este cenário tornou-se mais comum a partir da construção de uma rede de estradas na região durante os anos de 1960 e 1970 que permitiu a expansão da extração seletiva de madeira das florestas de terra firme (UHL; VIEIRA, 1989), (UHL et al., 1997).

2.2 Impacto da atividade madeireira na Amazônia

O desmatamento, conversão de áreas florestadas para ampliação da fronteira agrícola, não é a única ameaça à manutenção da cobertura florestal da Amazônia. Extensas áreas de florestas têm sido anualmente empobrecidas pela degradação causada pela atividade madeireira (NEPSTAD et al., 1999) e incêndios florestais (COCHRANE et al., 1999), sendo estes apontados como principais fatores que levam também à perda

de biomassa ao longo do tempo.

A exploração predatória representa 47% da madeira extraída na região do Pará ([LENTINI et al., 2003](#)), onde se começa extraindo somente espécies de alto valor econômico. Neste tipo de exploração, os madeireiros retornam à mesma área em intervalos curtos de tempo para extrair espécies de menor valor econômico ou de diâmetros menores, deixando severos impactos na floresta, como: aumento da susceptibilidade ao fogo ([HOLDSWORTH; UHL, 1997](#)), redução da biomassa viva ([GERWING, 2002](#)), aumento do risco de extinção de espécies locais ([MARTINI et al., 1994](#)) e emissão de carbono ([HOUGHTON, 1995](#)).

A exploração madeireira inicia o processo de degradação e uma mesma área pode ser submetida a vários eventos de extração. Por sua vez, as florestas exploradas são mais susceptíveis a incêndios por causa do acúmulo de radiação solar nas clareiras ([HOLDSWORTH; UHL, 1997](#)) e também, uma significativa quantidade de combustível fino, na forma de fragmentos residuais da exploração ([UHL; KAUFFMAN, 1990](#)); ([HOLDSWORTH; UHL, 1997](#)).

Nas áreas submetidas à exploração há mais tempo ocorre redução de matéria-prima com a falta de madeira no local e juntamente com os altos custos de transporte de toras de florestas distantes pode provocar a recorrência da exploração descrita por [Uhl et al. \(1997\)](#). Deste modo, novas extrações removem aproximadamente todos os indivíduos restantes de espécies comerciais, incluindo aqueles considerados anteriormente muito pequenos, ou seja, de diâmetros inferiores aos usualmente considerados de corte.

Em 1998, a produção de madeira em tora no bioma Amazônia foi de 42 milhões de metros cúbicos caindo para 31 milhões de metros cúbicos em 2004, passando para 14,2 milhões em 2009. Entre 1998 e 2004, a receita bruta do setor madeireiro na Amazônia Legal aumentou de R\$ 2,90 bilhões para R\$ 6,70 bilhões, sofrendo um decréscimo para R\$ 4,90 bilhões em 2009. Em 2005, a Amazônia brasileira respondeu por 79% da produção total dos países amazônicos, o que equivale a 24, 5 milhões de metros cúbicos de madeira em tora/ano, colocando o setor como uma das principais atividades econômicas na região ([LENTINI et al., 2003](#)); ([FAO, 2005](#)); ([LENTINI et al., 2005](#)); ([SFB; AMAZON, 2010](#)). [Lentini et al. \(2003\)](#) estimam que cerca de 50% da atividade madeireira praticada na Amazônia é realizada de forma predatória.

A indústria madeireira gerou aproximadamente 204 mil empregos em 2009, dos quais 66 mil empregos diretos (processamento e exploração florestal) e 137 mil empregos indiretos. A tabela 2.2 mostra a representatividade econômica e social da atividade madeireira na Amazônia Legal em 2009 ([SFB; AMAZON, 2010](#)).

Em 2009, a zona leste do Pará produziu em torno de 21% da madeira em tora extraída na Amazônia. Seus pólos madeireiros mais significativos foram Paragominas, Tailândia, Tomé-Açu e Ulianópolis. Em seguida, está a zona do Estuário Paraense,

Tabela 2.1 - Número de empresas, consumo de consumo de toras, produção processada, empregos e receita bruta da atividade madeireira na Amazônia Legal em 2009.

Estados	Número de empresas	Consumo de toras*	Produção processada*	Empregos (diretos + indiretos)	Receita bruta (milhões de R\$)
Acre	24	422	193	4.641	181,96
Amapá	48	94	41	1.516	32,10
Amazonas	58	367	142	6.525	115,19
Maranhão	54	254	90	3.975	59,00
Mato Grosso	592	4.004	1.795	56.932	1.598,36
Pará	1.067	6.599	2.550	92.423	2.177,61
Rondônia	346	2.220	925	34.825	713,49
Roraima	37	188	70	2.865	62,66
Amazônia Legal	2.226	14.148	5.806	203.702	4.940,39

* em milhares de m³

Fonte:(SFB; IMAZON, 2010).

cujo consumo atingiu aproximadamente 13% do volume de madeira (principalmente o pólo Belém). No Estado de Mato Grosso, a atividade madeireira foi mais significativa na zona noroeste (12% do consumo de toras), cujos principais pólos foram Colniza, Aripuanã e Juara; e na zona centro (11%), com Sinop e Feliz Natal como os pólos mais importantes. Finalmente, no Estado de Rondônia, a atividade madeireira foi mais significativa na zona norte, com 10% de todo o processamento de madeira da Amazônia. Seus pólos madeireiros mais importantes foram Ariquemes, Porto Velho e Cujubim 2.1 (SFB; IMAZON, 2010).

O mercado nacional aumentou sua participação na compra de madeira no ano de 2009, absorvendo 79% da madeira processada na Amazônia. O principal mercado é o Estado de São Paulo, representando 20% do consumo em 1998, 15% em 2004 e 17% em 2009. O Sudeste consumiu 14% em 2009, o Sul 15%, enquanto o Nordeste representou 12% do consumo. A região Centro-Oeste (excluindo-se Mato Grosso) consumiu apenas 4% e a Amazônia Legal representou uma demanda de 16% por madeira processada na própria região (2.2) (SFB; IMAZON, 2010).

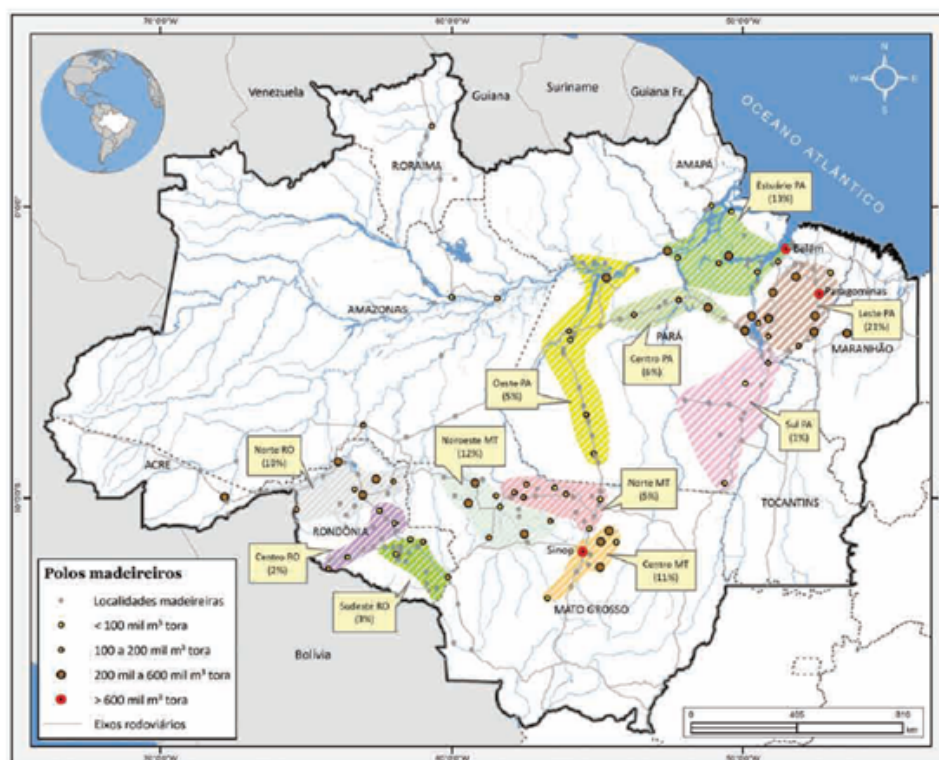


Figura 2.1 - Zonas e pólos madeireiros na Amazônia Legal em 2009.
Fonte: (SFB; IMAZON, 2010).

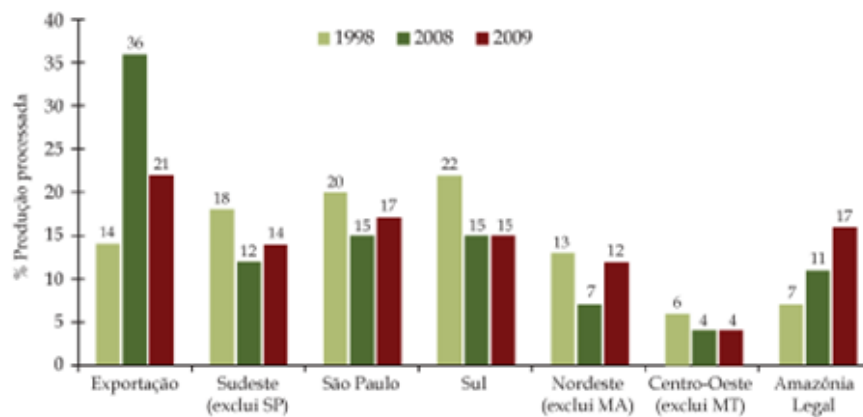


Figura 2.2 - Destino da madeira processada na Amazônia Legal em 1998, 2008 e 2009.
Fonte: (SFB; IMAZON, 2010).

2.3 Sistemas de exploração madeireira: manejo x desmatamento

A atividade madeireira praticada na Amazônia pode ser caracterizada segundo dois modos de operação: i) exploração convencional ou predatória, realizada sem planejamento técnico e ambiental e ii) exploração manejada ou exploração de impacto reduzido. No primeiro modelo as estradas e pátios de estocagem seguem formas desordenadas e mais longas, os cipós não são cortados antes da exploração e as árvores são derrubadas sem técnicas de corte, causando maior impacto na floresta. O segundo modo é caracterizado pelo planejamento da construção de estradas, pátios de estocagem e ramais de arraste, do corte de cipós antes da exploração e da derrubada direcional das árvores (JOHNS et al., 1996); (VIDAL et al., 1997); (HOLMES et al., 2002). A Figura 2.3 ilustra os dois sistemas de exploração adotados na Amazônia.

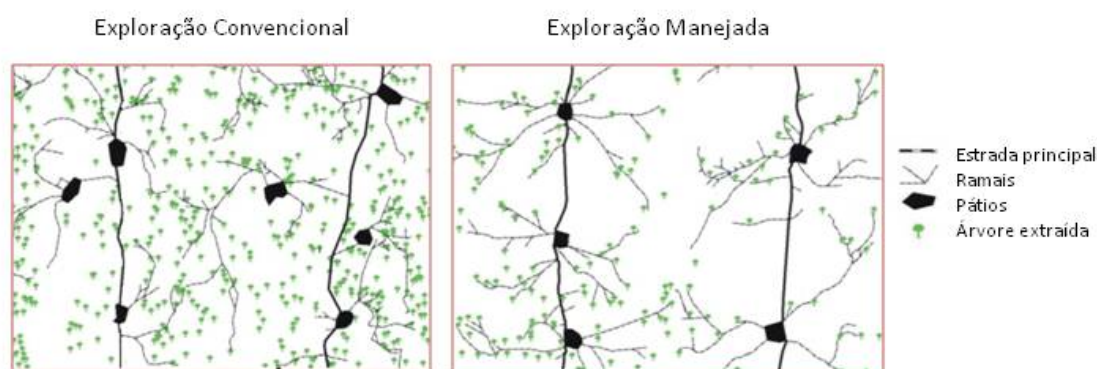


Figura 2.3 - Esquema da disposição da exploração convencional e manejada.

Fonte: Adaptado de Silva (2004).

Estes sistemas de exploração são citados por Uhl et al. (1997) e descrevem três formas de exploração madeireira em florestas de terra firme na Amazônia: a primeira está relacionada à exploração de baixo impacto, retirando árvores de valor comercial, e embora os madeireiros precisem abrir longas estradas no interior da floresta, sua distribuição espacial e a baixa densidade de espécies adultas por hectare, reduzem os danos ao ecossistema florestal. A segunda ocorre nas áreas próximas às estradas onde algumas árvores são removidas por hectare; a terceira é de alto impacto, caracterizando-se pela extração de 5 a 10 indivíduos por hectare. Neste caso se explora mais de 100 espécies de interesse comercial.

A extração seletiva consiste na retirada da madeira de um grupo de árvores de espécies selecionadas, em que somente as espécies de árvores mais valiosas são exploradas. A extração seletiva ocorre em meio a uma paisagem complexa, composta por florestas intactas, clareiras, estradas, pátios de estocagem e floresta danificada (VERÍSSIMO et al., 1995); (UHL et al., 1997); (JOHNS et al., 2007).

A exploração predatória de madeira extrai de 30 a 50 metros cúbicos de madeira em tora por hectare e reduz a cobertura total do dossel original de 80% para 45% em floresta ombrófila densa (UHL; VIEIRA, 1989). A redução pode atingir 39% quando a floresta é submetida à exploração de madeira seguida de intensa queimada (Gerwing2002). O corte seletivo remove tipicamente 3 a 9 árvores por hectare de aproximadamente 100 espécies com valor comercial (VERÍSSIMO et al., 1992), reduzindo de 20% a 40% a cobertura do dossel e a densidade de árvores, além do aumento de 200% na massa de resíduos lenhosos que poderiam servir como combustível para incêndios subseqüentes (UHL; KAUFFMAN, 1990); (VERÍSSIMO et al., 1992); (JOHNS et al., 1996).

A redução da prática de exploração madeireira ilegal depende de políticas fiscais adequadas e de opções tecnológicas, além de práticas agrícolas baseadas no uso intensivo da terra para garantir a rentabilidade, a capacidade produtiva e o mínimo de incorporação de novas áreas de florestas (HOMMA et al., 1998). Portanto, torna-se necessário o monitoramento e a formulação de planos de ação e estratégias que contribuam para o uso sustentável dos recursos florestais.

Segundo a nova legislação brasileira que define as práticas de exploração madeireira em florestas naturais na Amazônia (BRASIL, 2006), o diâmetro mínimo de corte (DMC) de cada espécie deve ser definido com base em estudos técnicos e, na ausência destes, poderão ser cortadas árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou superior a 50 cm. Entre outras práticas, a legislação determina ainda que possa ser explorado até 90% dos indivíduos acima do DMC de uma espécie na área destinada ao manejo em um dado ano, podendo essa porcentagem ser reduzida ou aumentada de acordo com a distribuição diamétrica e outras características ecológicas da espécie em questão. Estas informações, contudo, não estão disponíveis para todas as espécies madeireiras comercializadas na Amazônia brasileira, com raras exceções (GROGAN et al., 2006).

O manejo florestal de produtos madeireiros pode representar uma das poucas atividades economicamente viáveis que poderiam manter a biodiversidade sobre áreas extensas (FRUMHOFF, 1995). A recente designação de 500.000 km² de florestas nacionais públicas indica que métodos que minimizam impactos serão rapidamente implementados na Amazônia (VERÍSSIMO et al., 2002).

O manejo florestal voltado à produção sustentável de produtos madeireiros e não madeireiros constitui o principal alicerce das novas modalidades de gestão de florestas introduzidas pela Lei nº 11.284/2006 (BRASIL, 2009). O Plano Anual de Outorga Florestal estabelece sobre as concessões florestais no Brasil e tem dentre seus objetivos expandir e consolidar o manejo florestal, ampliando a área de florestas naturais manejadas sustentavelmente para 15 milhões de hectares até 2011 (BRASIL, 2009).

A extensão e a intensidade da exploração madeireira e a quantidade de tempo após a exploração são os fatores mais relevantes para se entender os efeitos diretos da

retirada de madeira sobre a floresta, bem como a resposta nas imagens de satélites. Nos primeiros anos após o término da exploração, a estrutura da vegetação em sítios explorados é inversa a da floresta original, ou seja, essas áreas apresentam um grande crescimento secundário nos estratos mais baixos e um dossel aberto ([VERÍSSIMO et al., 2002](#)).

2.4 Sensoriamento remoto da exploração madeireira

A detecção de corte seletivo de madeira com dados de sensoriamento remoto é mais complexa do que o monitoramento do desmatamento via corte raso. A floresta degradada é uma complexa mistura de diferentes condições fisionômico-estruturais, com vegetação, árvores mortas, solo e sombra. Além disso, nas clareiras estabelecidas, há ocorrência de uma rápida sucessão florestal, dificultando a fácil identificação da degradação florestal em imagens de satélites. Sensores de média resolução espacial, tais como TM e SPOT têm sido bastante utilizados para investigar este problema. No entanto, imagens de satélite de alta resolução, como IKONOS e QUICKBIRD e imagens de videografia também têm sido utilizados com esse propósito, porém com altos custos de aquisição ([GOFC-GOLD, 2002](#)).

O monitoramento de planos de manejo florestal na Amazônia requer tempo e custo elevado para verificação no campo. Imagens de satélites de resolução adequada têm o potencial de auxiliar neste esforço de monitoramento. É possível monitorar as fases de exploração, desde a condição florestal antes da autorização de plano de extração, até a fase de construção dos pátios de estocagem e sinais de possíveis irregularidades como o nível de degradação em virtude de uma exploração recorrente ou mesmo, práticas de desmatamento ilegal após a exploração madeireira ([GOFC-GOLD, 2002](#)).

Com a aprovação da Lei 11.284/2006, que delibera sobre a Gestão de Florestas Públicas, o Governo necessita recorrer a tecnologias avançadas para monitorar a ocorrência de áreas com atividades de exploração madeireira, assim como a intensidade destas atividades para realizar uma fiscalização efetiva do cumprimento dos termos das concessões florestais previstas na Lei ([BRASIL, 2009](#)).

Outro fator importante relacionado ao monitoramento da exploração madeireira diz respeito à emissão de gases de efeito estufa (GEE), seja por desmatamento ou corte seletivo. Nas últimas décadas, esta temática tornou-se foco em diversos países ao tentar quantificar o conteúdo de carbono emitido e estocado em florestas tropicais para criar um mercado de carbono, também conhecido como "desmatamento evitado"([FEARNSIDE, 1999](#)) na busca da valoração econômica das florestas.

Recentemente estão sendo discutidas possibilidades de criação de um fundo monetário internacional para facilitar a Redução de Emissões de Desmatamento e Degradação (REDD). O conceito de REDD está ganhando destaque nas negociações internacionais de clima e tem potencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa a custos baixos e, ao mesmo tempo, gerar financiamento para conservar as

florestas tropicais. Assim, mecanismos internacionais podem contribuir para estabilizar os níveis de emissões de carbono e o princípio de REDD tem o objetivo de criar valores econômicos para a floresta em pé, ou para o desmatamento evitado, sendo, portanto, um mecanismo criado para evitar a emissão de carbono (SANTILLI et al., 2005).

Muitas atividades madeireiras podem causar degradação das reservas de carbono das florestas, porém nem todas podem ser monitoradas usando dados de sensoriamento remoto. A abertura no dossel causada pelo corte seletivo de árvores (legais e ilegais) pode ser detectada em imagens da série LANDSAT utilizando técnicas sofisticadas e esta tarefa torna-se mais fácil quando a atividade de exploração madeireira é mais intensa, ou seja, maior número de árvores explorado (GOFC-GOLD, 2002).

Uma combinação de exploração madeireira legal seguida por atividades ilegais numa mesma área é também susceptível de causar degradação, com características de mudanças no dossel e, conseqüentemente, maior possibilidade de que esta atividade pode ser detectada em imagens orbitais. Áreas de florestas submetidas ao corte seletivo também podem ser interpretadas em imagens de sensoriamento remoto baseadas na observação das estradas e pátios, que muitas vezes são claramente reconhecíveis nas imagens (GOFC-GOLD, 2002). Atualmente, duas abordagens são utilizadas para monitorar o corte seletivo: i) a abordagem direta, que detecta abertura no dossel e ii) abordagem indireta que detecta estradas de acesso e pátios de estocagem de madeira.

O monitoramento por satélite da Amazônia é um dos grandes desafios para a redução dos impactos causados pela exploração madeireira e diversas técnicas utilizando imagens de satélite já foram testadas para a detecção e quantificação de áreas sob atividade madeireira.

2.4.1 Detecção e mapeamento da exploração madeireira por satélite

Estimativas de áreas de florestas afetadas pela exploração madeireira têm sido mais comumente realizadas através de técnicas de interpretação visual de imagens, em virtude da dificuldade na delimitação automática realizada por algoritmos de classificação. As estradas de acesso, clareiras e os pátios de estocagem de madeira são identificáveis nas imagens digitais ((STONE; LEFEBVRE,). Apesar da técnica de interpretação visual permitir a delimitação entre as áreas exploradas pela atividade madeireira e áreas de florestas tropicais intactas, o delineamento das áreas exploradas por este método está sujeito a erros subjetivos de interpretação. Áreas com atividades de exploração sutis tais como àquelas de baixa intensidade de exploração ou em fase inicial podem ser desconsideradas pelo intérprete, aumentando a incerteza na estimativa das áreas exploradas.

Uma maneira de contornar esta limitação é o uso de imagens de resolução métrica e sub-métrica como as dos satélites IKONOS e QUICKBIRD, que apresentam elevado

potencial para a caracterização do nível de impacto da exploração florestal (READ et al., 2003). Porém, o custo destas imagens perante a extensão territorial afetada por essa prática de exploração, e a baixa frequência de observação são as maiores limitações do uso dessa fonte de dados para fins de monitoramento.

As técnicas empregadas para mapear a exploração madeireira vão desde as mais simples, como a interpretação visual (WATRIN; ROCHA, 1992); (STONE; LEFEBVRE,); (JANECZEK, 1999); (SANTOS et al., 2001); (MATRICARDI, 2003), até as mais robustas, como métodos automáticos utilizando modelo linear de mistura espectral (JÚNIOR; BARRETO,); (JÚNIOR et al.,); (ASNER et al., 2005) e de análise de vetor de mudanças e crescimento de regiões (SILVA, 2003), (GRAÇA et al., 2005); (JÚNIOR et al., 2005b).

Pesquisas realizadas por diferentes autores e com abordagens distintas demonstram a viabilidade de se mapear áreas com evidência de atividade de exploração florestal a partir de dados de sensoriamento remoto orbital (JÚNIOR; BARRETO,); (SANTOS et al., 2001); (ARAGÃO et al., 2001); (ESPÍRITO-SANTO et al., 2004); (GRAÇA, 2004); (GRAÇA et al., 2005); (MONTEIRO et al., 2003); (JÚNIOR et al.,); (JÚNIOR et al., 2005a). A viabilidade da aplicação de imagens de satélites no monitoramento de áreas de corte seletivo também foi demonstrada em Asner et al. (2002), Asner et al. (2004), porém com a ressalva de que áreas com exploração de baixo impacto não são imediatamente detectáveis nas imagens com baixa resolução espacial.

Watrin e Rocha (1992) mapearam a exploração madeireira no Pará a partir da interpretação visual utilizando imagens TM/LANDSAT do ano de 1988. Esses autores identificaram a presença de pátios e estradas e adotaram como indicador de área explorada, porém não definiram critérios para limitação do perímetro mapeado.

Stone e Lefebvre () utilizaram imagens dos anos de 1986, 1991 e 1998 do sensor TM/LANDSAT para definir a localização e extensão da exploração madeireira em uma região do Pará. Para isto, empregaram a técnica de classificação supervisionada (algoritmo de máxima verossimilhança). Os resultados do emprego da técnica de classificação mostraram que 80% das áreas de floresta explorada seletivamente na imagem de 1988 foram classificadas como floresta em 1991 e 13% da área de floresta explorada seletivamente em 1988 ainda foi identificada na imagem de 1991. A técnica de classificação utilizada não separou espectralmente uma área de floresta explorada de uma floresta intacta. As áreas de floresta explorada depois de três anos não são mais discrimináveis de floresta intacta em imagens de satélite.

Janeczek (1999) testou um algoritmo de textura para detectar pátios e a partir de interpretação visual estimou indiretamente a área de corte seletivo de madeira na Amazônia brasileira utilizando imagens TM/LANDSAT. Os pátios foram identificados de forma mais eficaz com a banda 5, porque o solo exposto reflete mais radiação recebida nesses comprimentos de onda do que a vegetação, resultando em um bom contraste nas imagens. Este estudo não foi avaliado devido à falta de dados de campo, mas o autor sugeriu que a técnica pode ser melhorada através da integração

de imagens de satélite de alta resolução espacial.

Júnior e Barreto () utilizaram a fração solo do modelo linear de mistura espectral em imagens TM/LANDSAT e aplicação de *buffers* de 180 metros em torno de pátios de estocagem para detectar exploração madeireira no estado do Pará. Os pátios e estradas de acesso rapidamente se tornaram indetectáveis devido à rápida regeneração da floresta em áreas com solos expostos. A taxa de detecção de pátios diminuiu com o tempo para praticamente zero dentro de 3-4 anos. Assim, sugeriram que, o monitoramento da atividade madeireira deve ser feito com imagens obtidas em no máximo dois anos de intervalo. Matricardi (2003) utilizou a mesma distância estimada por Júnior e Barreto () para mapear e quantificar as áreas de abrangência da exploração madeireira em florestas de terra firme da Amazônia brasileira.

Santos et al. (2001) utilizaram imagens TM/LANDSAT para mapear corte seletivo na Amazônia brasileira no período de 1988 a 1998. A interpretação visual de 26 cenas resultou na estimativa de 17.146 km² para o período analisado, correspondendo em média a 1580 km²/ano de floresta explorada para retirada de madeira.

Um método semi-automático baseado na interpretação visual e aplicação de *buffers* foi testado por Matricardi (2003), Matricardi et al. (2005), Matricardi et al. (2007), resultando no mapeamento do corte seletivo na região Amazônica brasileira com estimativa de 5.980 km² em 1992, 10.064 km² em 1996 e 26.085 km² em 1999.

Técnicas para detectar a área afetada pela exploração madeireira na Amazônia também foram testadas por Monteiro (2005) com o objetivo de monitorar indicadores de exploração madeireira (presença de pátios e estradas de arraste, respeito às áreas de preservação permanente e proteção florestal contra incêndios) utilizando modelo linear de mistura espectral, segmentação e classificação orientada a objeto em imagens TM/LANDSAT, ASTER e IKONOS. Monteiro (2005) mapeou áreas de exploração madeireira no Estado do Mato Grosso com o uso de imagens fração-solo do sensor TM/LANDSAT e classificação ISODATA. A área afetada pela exploração madeireira foi de 10.731 ha em Sinop, 19.391 ha em Marcelândia e 25.276 ha no município de Cláudia nos anos de 1992, 1996 e 1999.

Uma abordagem utilizando SIG e imagens-fração solo foi aplicada por Espírito-Santo et al. (2004). A álgebra booleana e a técnica *Analytical Hierarchy Process* (AHP) permitiu detectar exploração madeireira associada a rios e às estradas.

Graça (2004) encontrou resultados satisfatórios para evidenciar áreas sob exploração madeireira a partir de imagens fração, conforme Figura 2.4. As imagens fração solo, vegetação e sombra apresentam em tons de cinza mais claro a predominância dos componentes puros de suas respectivas frações. A fração solo realça áreas de solo exposto, permitindo identificar com facilidade as estradas de acesso e áreas de pátios de estocagem. Alvos como estradas e pátios nas imagens TM/LANDSAT são indicadores importantes na detecção de áreas de floresta exploradas (WATRIN;

ROCHA, 1992); (STONE; LEFEBVRE,); (SANTOS et al., 2001).

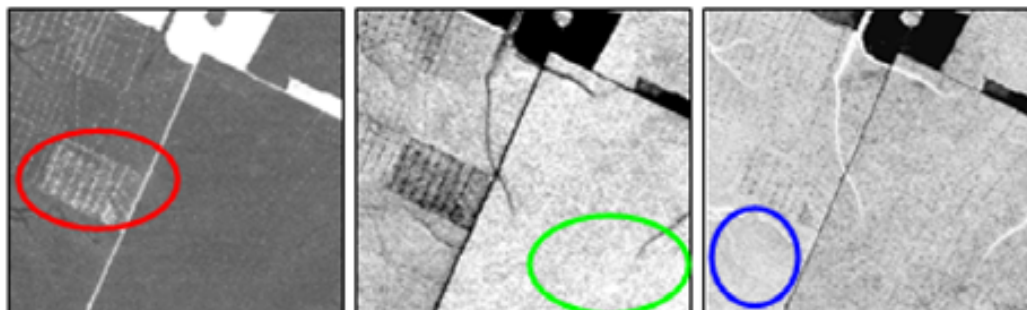


Figura 2.4 - Imagens fração solo (círculo vermelho), vegetação (círculo verde) e sombra (círculo azul), derivadas do MLME.

Fonte: (GRAÇA, 2004).

Júnior et al. () utilizaram imagens-fração derivadas de modelos de mistura espectral em imagens SPOT para classificar áreas de exploração madeireira no Estado do Pará. A abordagem adotada por estes autores requer uma definição prévia das assinaturas espectrais para cada fração (vegetação verde, vegetação não fotossintética, solo e sombra). Utilizando um classificador de árvore de decisão, eles foram capazes de classificar a imagem com 86% de precisão global. Os autores concluíram que mais estudos são necessários para a avaliação de extração seletiva de madeira em outras regiões com diferentes tipos de florestas, como no estado de Mato Grosso, Brasil.

Júnior et al. (2005b) encontraram resultados promissores ao desenvolver um algoritmo específico que utiliza quatro frações de cena que, combinadas linearmente, resultam no Índice da Diferença Normalizada de Frações (NDFI). Estes autores usaram imagens do sensor TM para detectar as marcas da atividade madeireira e de pequenas queimadas, não identificadas pelos satélites através dos métodos convencionais de processamento. O NDFI se baseia no fato de que a vegetação, o solo e matéria morta produzem assinaturas espectrais diferentes no sinal de satélite.

Asner et al. (2004) conduziram um estudo no Estado do Pará e utilizaram imagens-fração para avaliar o corte seletivo de madeira. Os autores concluíram que a área degradada causada pela atividade madeireira não poderia ser estimada com base na presença de pátios. No entanto, isso contradiz diretamente Júnior e Barreto (), que já estimaram áreas de corte seletivo com base na detecção de pátios. O estudo de Asner et al. (2004) simulou uma relação entre áreas desmatadas em diferentes anos e imagens multitemporais com detecção de pátios. Estes autores encontraram baixa correlação entre o número de árvores removidas ou intensidade dos métodos de exploração com o número de pátios e a área de exploração madeireira. Porém, esta constatação não é suficiente para descartar estimativas de áreas com exploração

madeira a partir da detecção de pátios de estocagem.

Asner et al. (2005) também desenvolveram uma técnica de sensoriamento remoto para mapear florestas degradadas pela extração seletiva, utilizando imagens TM/LANDSAT e o sistema CLAS (Carnegie Landsat Analysis System). A partir desta metodologia, os autores mapearam extração seletiva de madeira sobre imagens TM/LANDSAT com 86% de exatidão global.

Os componentes ou frações de cena utilizados no método de Júnior et al. (2005a) são baseados no pressuposto de que a imagem é formada por uma combinação linear de n espectros puros (ADAMS et al., 1990), deste modo a reflectância detectada em um pixel é o resultado da soma dos valores de reflectância de componentes de cena como solo, sombra, vegetação verde e vegetação não-verde (troncos, galhos e folhas secas). Júnior et al. (2005a) encontraram exatidão de 94%, enquanto Asner et al. (2005) apresentaram 86% de exatidão utilizando o CLAS. Ambos os autores utilizam uma biblioteca espectral que compreende a variação geral das propriedades do dossel e do solo, de modo que a vegetação viva é denominada como vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto que a vegetação morta é definida como vegetação não-fotossintética, expressa no espectro como material superficial brilhante com características associadas a compostos secos de carbono.

Tais assinaturas espectrais dizem respeito aos dados utilizados para converter os pixels de imagens de satélite em informações ecologicamente relevantes para uso em geral. No entanto, a implementação da metodologia adotada por Júnior et al. (2005a) e Asner et al. (2005) depende da existência de uma biblioteca de espectros de referência que esteja associada a diferentes tipos de floresta e que considere a variabilidade do dossel e do solo. Desta forma, esta técnica limita-se às coletas de espectroradiômetros de campo e de imagens de satélites hiperespectrais analisados em estudos de campo realizados de 1996 a 2003 por Asner et al. (2004), Asner et al. (2005).

Silva (2004) utilizou interpretação visual e análise automática de imagens TM/LANDSAT. Para o método de análise automática, foram aplicados *buffers*, variando de 150 metros para 270 metros, em múltiplos de 30, de acordo com a resolução espacial do sensor.

Maldonado et al. (2009) utilizaram a componente solo obtida por Rotação Radiométrica Controlada para detectar exploração madeireira. Esta técnica consiste em rotacionar a partir de diferentes ângulos o espaço bi-temporal das imagens para produzir a imagem para a detecção de feições relacionadas com a exploração madeireira.

Matricardi et al. () realizaram análise detalhada da extração seletiva de madeira e os impactos dos incêndios florestais no Mato Grosso. Foi utilizada uma série de imagens TM/LANDSAT referente ao período de 1992 a 2004 para testar diferentes técnicas de sensoriamento remoto com a finalidade de medir a extensão do corte seletivo de

madeira e os incêndios florestais. Neste estudo, a extração seletiva de madeira foi responsável por perturbar a floresta natural em maior proporção (31%) do que o desmatamento (29%), observando uma série temporal de treze anos.

Os estudos mencionados identificam e mapeiam áreas distintas, de modo que há abordagens desenvolvidas para mapear a área explorada total, que incorpora pátios, estradas e entorno da exploração, realizando o mapeamento a partir da interpretação visual e métodos semi-automáticos, como aplicação de *buffers*. Por outro lado, outras técnicas vêm sendo desenvolvidas no intuito de detectar a exploração madeireira por métodos automáticos, como NDFI, árvore de decisão, CLAS e análise orientada a objeto (AOO). A figura 2.5 sintetiza alguns trabalhos realizados no intuito de mapear a exploração madeireira na Amazônia.

Estes estudos baseados em dados de sensoriamento remoto foram conduzidos para detectar corte seletivo na Amazônia brasileira e mostraram a viabilidade de usar imagens de satélite no monitoramento da exploração madeireira, que ao contrário dos sistemas de monitoramento do desmatamento, ainda há muitos avanços a serem alcançados. A avaliação destes estudos torna-se limitada por falta de verdade terrestre, uma vez que os dados de limites de áreas de manejo florestal não estão amplamente disponíveis e também há dificuldade em obter informações de retirada de madeira em áreas exploradas ilegalmente.

2.5 Sistemas de monitoramento em operação na Amazônia

O programa de monitoramento da Amazônia realizado pelo INPE utiliza quatro sistemas operacionais complementares e com diferentes abordagens: PRODES, DETER, QUEIMADAS e DEGRAD (PRODES, 2009).

O sistema PRODES mede as taxas anuais de corte raso desde 1988 e considera desmatamentos com áreas superiores a 6,25 hectares. É realizado apenas uma vez por ano, por ser mais detalhado e depender das condições climáticas da estação seca para aquisição de imagens livres de nuvens. Já o DETER é um sistema de apoio à fiscalização e controle do desmatamento, que é divulgado mensalmente a partir de mapas de alertas para áreas maiores que 25 hectares. O DETER indica tanto áreas totalmente desmatadas como áreas em processo de desmatamento por degradação florestal progressiva.

O DEGRAD foi desenvolvido em função das indicações do crescimento da degradação florestal da Amazônia e mapeia as áreas em processo de desmatamento onde a cobertura florestal ainda não foi totalmente removida. Desde modo, inclui áreas de exploração madeira e também áreas com ocorrência de incêndios florestais. O sistema aplica realce de contrastes em imagens LANDSAT e CBERS para evidenciar áreas degradadas e fornece anualmente desde 2008 taxas de áreas degradadas.

O IMAZON também desenvolve pesquisas relacionadas à degradação florestal por

meio do Sistema de Alerta do Desmatamento (SAD) utilizando imagens de satélite MODIS para informar estimativas mensais. Os resultados também indicam a viabilidade de monitorar a exploração florestal na Amazônia

Ambos os sistemas de monitoramento utilizam imagens de baixa e média resolução temporal para calcular a área degradada.

O programa espacial brasileiro conta com a distribuição gratuita de imagens de satélite de alta resolução através da câmara HRC do satélite CBERS-2B. Desta forma, imagens com resolução de 2,7 metros dos anos de 2007 a 2010 estão disponíveis. O satélite CBERS-3, com lançamento previsto para 2011, também realizará imageamentos de alta resolução a partir da câmera PANMUX, com resolução espacial de 5 metros na banda pancromática e de 10 metros nas bandas 2, 3 e 4, que correspondem à faixa do verde, vermelho e infravermelho próximo ([INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS \(INPE\), 1997](#)).

Autores	Método	Satélite	Região	Avanços	Limitações
Watrin & Rocha (1992)	- Interpretação visual	LANDSAT	Pará	- Fornece uma estimativa de área afetada	- Exige capacidade e experiência do interprete; - Processo demorado.
Stone & Lefebvre (1998)	- Interpretação visual e - Classificação supervisionada	LANDSAT	Pará	- Fornece uma estimativa de área afetada	- Uso de imagens subsequentes à exploração
Janeczek (1999)	- Análise de textura - Aplicação de buffer	LANDSAT	Amazônia	- Fornece uma estimativa de área afetada	- Generalizações quanto aos tipos de floresta e intensidade de exploração
Santos et al. (2001)	- Interpretação visual	LANDSAT	Amazônia	- Fornece uma estimativa de área afetada	- Exige capacidade e experiência do interprete; - Processo demorado.
Matricardi (2003)	- Interpretação visual - Aplicação de <i>buffers</i>	LANDSAT	Amazônia	- Fornece uma estimativa de área afetada	- Exige capacidade e experiência do interprete; - Incorpora um único formato de área explorada
Monteiro (2003)	- Modelo de Mistura - AOO	LANDSAT ASTER IKONOS	Pará e Mato Grosso	- Controle de indicativos e exploração madeireira	- Requer imagens de alta resolução
Graça (2004)	- Rotação Controlada por Eixo de Não-Mudança	LANDSAT	Mato Grosso	-Desenvolvimento de nova técnica	- Necessita calibração da fração solo para a região
Souza Jr et al. (2005)	- NDFI - Crescimento de regiões	SPOT	Mato Grosso	-Desenvolvimento de nova técnica - Abordagem de degradação florestal	- Não detecta a área - Falta replicação para outras áreas testes
Asner et al. (2005)	CLAS	LANDSAT	Amazônia	-Desenvolvimento de nova técnica - Análise multitemporal	- Necessita calibração - Requer supercomputador - Necessita de pares de imagens para análise multitemporal
Maldonado et al. (2009)	Rotação Radiométrica	LANDSAT	Acre	Desenvolvimento de nova técnica	- Falta replicação para outras áreas testes
Matricardi et al. (2010)	- Dados de campo - Índices de vegetação - SMA - NVP	LANDSAT	Amazônia	- Aplicação de diferentes técnicas - Abordagem de degradação florestal	- Comparar com outros índices de vegetação

Figura 2.5 - Exemplos de trabalhos realizados para detectar corte seletivo e suas respectivas metodologias.

3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO USO DE DADOS DA CÂMERA HRC/CBERS-2B PARA ESTUDOS EM ÁREAS DE EXPLORAÇÃO MADEIREIRA POR CORTE SELETIVO

3.1 Introdução

Nas últimas décadas, as florestas tropicais na Amazônia brasileira têm sido intensamente afetadas pelo corte seletivo de madeira, seja realizado via métodos legais de exploração ou para dificultar o monitoramento por meio dos sistemas de observação da terra que identificam desmatamento por corte raso. O corte seletivo refere-se à retirada de espécies de interesse comercial enquanto o corte raso é a supressão total da vegetação com o objetivo de implantar outro uso da terra, como pastagem ou agricultura.

A retirada de árvores de valor comercial na Amazônia é realizada por meio de dois sistemas de exploração madeireira: convencional e manejo florestal. O sistema convencional é realizado por uma equipe de motosserristas que entra na floresta após um identificador botânico, que possui o conhecimento prévio das espécies, ter indicado a localização das árvores a serem derrubadas. Em seguida, uma equipe de tratoristas constrói as estradas para o transporte das toras, que as empilha e abre os pátios para estocá-las. Posteriormente, as toras são transportadas para as serrarias.

O sistema que adota o manejo florestal segue as normas florestais federais para a Amazônia, que vão desde as normas técnicas (leis, decretos, instruções normativas e normas de execução vigentes) até as orientações para os técnicos dos órgãos ambientais nas suas rotinas de vistorias e análise de projetos florestais. Desta maneira, o arranjo da exploração no manejo sustentável é diferente do sistema convencional, pois uma equipe realiza o planejamento da infra-estrutura da exploração, delimitando as estradas principais e secundárias; seleciona as árvores a serem derrubadas com base no inventário florestal e planeja a distribuição dos pátios de estocagem.

A detecção de corte seletivo de madeira com dados de sensoriamento remoto exige mais recurso do que o monitoramento do desmatamento via corte raso. Sensores de média resolução espacial como TM e ETM da série LANDSAT têm sido bastante utilizados para investigar este problema, conforme estudos citados no capítulo 2. Imagens de satélite de alta resolução, como IKONOS e SPOT também oferecem potencial para esse propósito, porém com altos custos de aquisição. Apesar de imagens da câmera HRC/CBERS de alta resolução serem distribuídas gratuitamente, os estudos envolvendo análise para uso em florestas são ainda restritos (SERVELLO et al., 2008; SILVA et al., 2009). Os trabalhos utilizando estas imagens vêm sendo realizados amplamente apenas no sentido de testar a fusão da HRC com outros sensores (LEONARDI et al., 2009; FREITAS et al. 2009) e com o objetivo de avaliar a qualidade radiométrica e geométrica das imagens (GOUVEA e FONSECA, 2009; SILVA et al., 2009).

Neste sentido, a exploração madeireira por corte seletivo levantou a seguinte questão a ser discutida neste capítulo: é possível caracterizar evidências de manejo florestal a partir do uso de imagens HRC/CBERS? Este estudo tem como objetivo descrever padrões de exploração florestal em imagens de alta resolução e verificar sua utilidade como verdade terrestre para estudos no campo florestal.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo [3.2.1](#) está localizada na porção norte do estado do Mato Grosso e foi selecionada de acordo com a disponibilidade de imagens de alta resolução nesta região, a qual apresenta um histórico de forte pressão por atividade madeireira, com presença de pólos madeireiros importantes, conforme apresentado na secção 2.2 do capítulo anterior.

Esta região está situada numa porção coberta por floresta tropical de transição (entre cerrado e floresta ombrófila aberta), sobre relevo plano a suavemente ondulado. Predominam na região os solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, com boa drenagem. O clima é tropical quente úmido, com quatro meses de estação seca (maio a agosto). A pluviosidade média anual fica em torno de 2000 mm. A temperatura anual varia de 15° a 35° C (RADAMBRASIL, 1981).

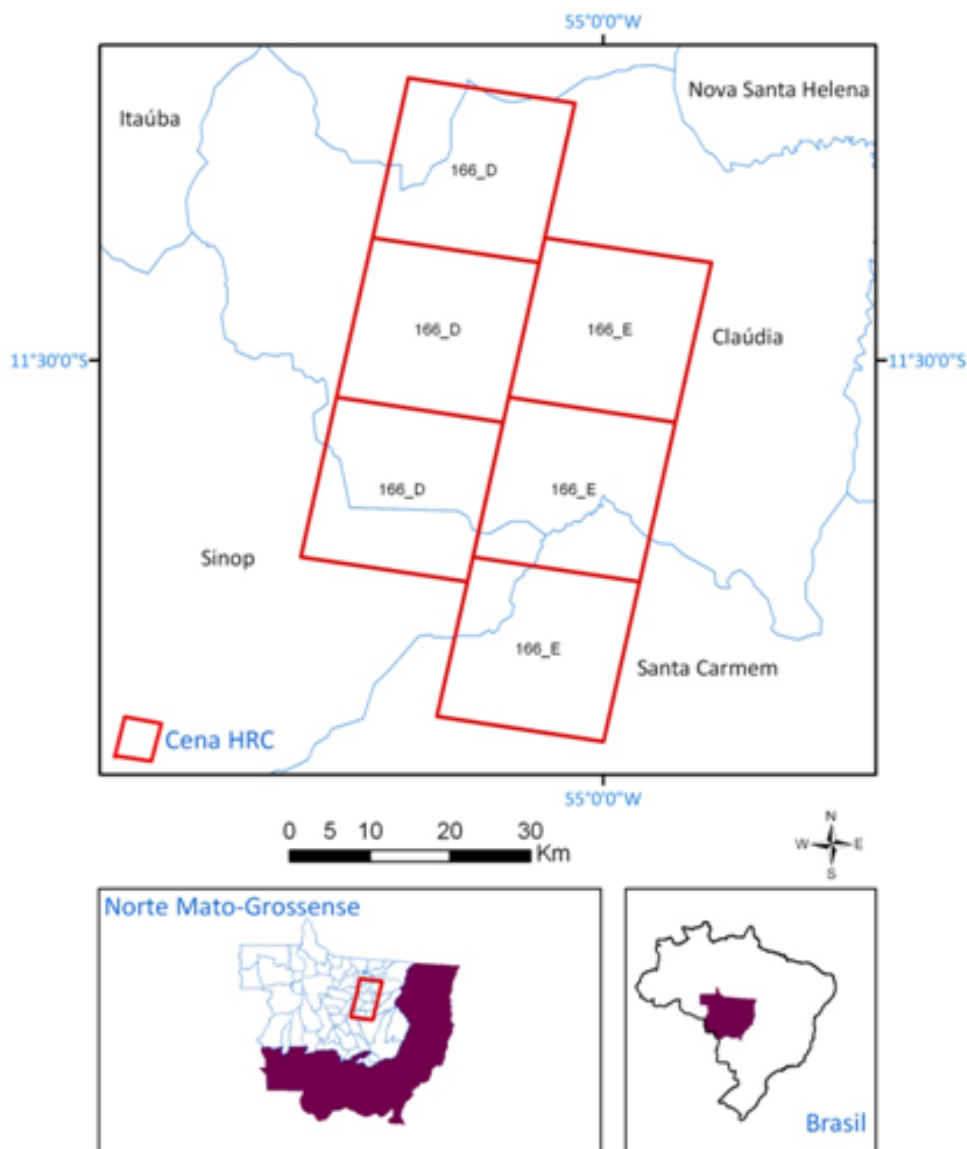


Figura 3.1 - Localização da área de estudo e grade de cobertura das imagens HRC/CBERS utilizadas no estudo.

3.2.2 Dados de sensoriamento remoto

Este trabalho utilizou imagens do sensor HRC/CBERS (Tabela 3.1) obtidas junto à Divisão de Geração de Imagens do INPE (DGI-INPE), sendo consultada através do catálogo eletrônico disponibilizado pela instituição <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. A câmera *High Resolution Camera* (HRC) está presente somente no satélite CBERS-2B e opera em uma única faixa do espectro eletromagnético, que cobre toda a região do visível e parte do infravermelho próximo. A câmera HRC é capaz de imagear uma faixa de 27 km de largura no terreno e possui

Tabela 3.1 - Imagens HRC/CBERS utilizadas na pesquisa.

Sensor/Satélite	Órbita/Ponto	Data de Aquisição
HRC/CBERS	166-D 113-1	21/08/2008
HRC/CBERS	166-D 113-2	21/08/2008
HRC/CBERS	166-D 113-3	21/08/2008
HRC/CBERS	166-E 113-2	16/09/2008
HRC/CBERS	166-E 113-3	16/09/2008
HRC/CBERS	166-E 113-4	16/09/2008

Tabela 3.2 - Características principais da câmera HRC/CBERS.

Resolução espacial	2,7 metros
Banda espectral	pancromática ($0,50 \mu m - 0,80 \mu m$)
Resolução radiométrica	8 bits
Largura da faixa imageada	27 km (nadir)
Resolução temporal	130 dias

resolução espacial de 2,7 m. Essas características produzem imagens que permitem a observação detalhada dos objetos imageados na superfície terrestre. A tabela 3.2 apresenta as principais características da câmera HRC/CBERS.

3.2.3 Recursos computacionais

O processamento das imagens foi realizado com o programa SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (INPE, 2010).

O projeto no banco de dados geográficos foi definido utilizando o sistema de projeção UTM, Fuso 21, Datum WGS 1984, devido à facilidade de manipulação dos dados para cálculo de área e de distância.

3.2.4 Registro de imagens

As imagens HRC foram registradas utilizando como referência o mosaico ortorretificado, disponível na base de dados GeoCover (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>). O procedimento foi realizado com a identificação de pontos de controle bem distribuídos nas cenas e ajuste de um polinômio de 1º grau para efetuar a associação das coordenadas da imagem HRC com os pontos de controle na imagem de referência. O erro de posicionamento expresso pelo *Root Mean Square* (RMS) foi sempre menor que 0,50 pixel para todas as cenas, considerado aceitável por corresponder a menos de um pixel da imagem.

3.2.5 Teste de classificação floresta e não-floresta

Foi utilizado o método de classificação supervisionado máxima verossimilhança (MaxVer) (RICHARDS, 1986), por ser o método de classificação pixel a pixel mais utilizado. Este classificador utiliza parâmetros estatísticos de probabilidade para agrupamento de classes a partir de amostras de treinamento, pressupondo que a distribuição de probabilidade das classes seja normal (SCHOWENGERDT, 1997), ou seja, é uma classificação pontual, baseada no valor radiométrico do pixel e nos parâmetros da distribuição Gaussiana de cada uma das classes de treinamento.

3.2.6 Extração de informações sobre pátios de estocagem

A imagem classificada foi utilizada para detectar pátios de estocagem. Com o intuito de eliminar as áreas de desmatamento classificadas incorretamente como pátio, foi utilizada uma máscara contendo dados de desmatamento do PRODES. Com base nessa máscara foi possível selecionar os pátios classificados corretamente.

3.2.7 Características radiométricas e geométricas das feições

Para explorar as características radiométricas e geométricas dos pátios de estocagem foram selecionados aleatoriamente 30 polígonos de pátios obtidos na imagem classificada. Em seguida, foram extraídos os valores de intensidade dos pixels (ND) de cada pátio e seu entorno. A distância entre o pátio e sua borda foi utilizada para definir os valores de intensidade (ND) correspondentes ao centro do pátio e a floresta.

A dimensão dos pátios e a distância entre eles foram adquiridas a partir das operações métricas disponível no SPRING, e analisadas posteriormente. As medidas obtidas foram exportadas para planilha eletrônica para posterior análise.

3.2.8 Preparação de verdade terrestre

Os pátios de estocagem foram identificados a partir de interpretação visual das imagens HRC. Como as imagens são de alta resolução espacial, neste estudo elas foram consideradas como verdade terrestre.

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Características radiométricas e geométricas das feições

A análise exploratória permitiu obter informações sobre as características das feições dos pátios, mostrando que estes se apresentam nas imagens de satélite como um ponto de destaque em meio à floresta devido ao contraste entre pátio e vizinhança. Os valores de pixel dos pátios são mais brilhantes do que os valores de floresta e permanecem numa distância de 30 metros, ou seja, o tamanho do pixel de uma imagem TM/LANDSAT, por exemplo. A Figura 3.2 apresenta o gráfico com os resultados obtidos a partir do perfil extraído das áreas de transição entre pátio e

floresta na imagem HRC/CBERS-2B.

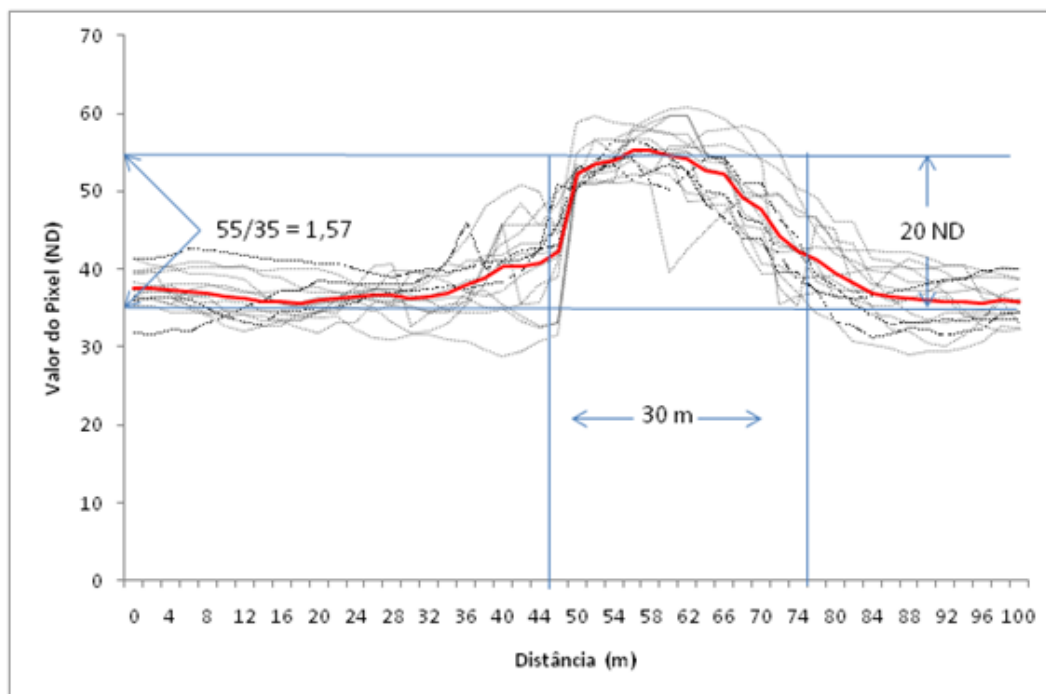


Figura 3.2 - Perfil de distribuição do brilho na imagem HRC/CBERS-2B em áreas de transição entre pátio e floresta.

Como pode ser observado na Figura 3.2, as áreas de pátio apresentam mais brilho do que seu entorno, como valores de pixel (ND) na faixa entre 35 e 55. A relação de 1,57 encontrada significa que os pátios são 57% mais brilhantes do que a floresta. Desta forma, o contraste criado pela diferença na quantidade de luz refletida das superfícies de solo e floresta mostra que o pátio pode ser detectado a partir deste contraste e que sua resposta é sensível aos sensores de media resolução, sendo evidenciada numa distância de no máximo 30 metros.

3.3.2 Análise quantitativa dos pátios: área e contraste na borda

A dimensão dos pátios adquirida nas 30 amostras selecionadas mostrou que os pátios apresentaram em média 381,88 m². De modo que, em geral os pátios construídos em áreas de planos de manejo seguem a recomendação do tamanho de 20 x 20 metros a 25 x 25 metros, ou seja, podem variar de 400 m² a 625 m².

A Tabela 3.3 apresenta a área dos pátios observados na imagem classificada. Observa-se que houve uma variação na dimensão encontrada, com pátios medindo cerca de 120 m², bastante inferior ao normalmente estabelecido, assim como pátios com aproximadamente 750 m². Estas variações podem ser explicadas pelo fato de

Tabela 3.3 - Dimensão dos pátios mapeada a partir da imagem classificada.

	Área (m ²)		Área (m ²)
Pátio 1	753,97	Pátio 16	210,09
Pátio 2	342,44	Pátio 17	411,05
Pátio 3	149,06	Pátio 18	477,72
Pátio 4	346,36	Pátio 19	236,18
Pátio 5	126,49	Pátio 20	222,05
Pátio 6	374,09	Pátio 21	222,05
Pátio 7	476,20	Pátio 22	367,24
Pátio 8	595,50	Pátio 23	279,21
Pátio 9	759,09	Pátio 24	397,98
Pátio 10	459,09	Pátio 25	276,15
Pátio 11	439,35	Pátio 26	388,22
Pátio 12	418,82	Pátio 27	375,35
Pátio 13	722,77	Pátio 28	123,25
Pátio 14	646,36	Pátio 29	274,94
Pátio 15	278,60	Pátio 30	306,83

Tabela 3.4 - Distância entre pátios mapeada a partir da imagem classificada.

Distância mínima (m)	230,40
Distância máxima (m)	989,46
Distância média na área (m)	462,12

pátios ainda estarem sendo construídos e pátios abertos sem seguir recomendação adotada para planos de manejo, bem como pátios em regeneração. No entanto, estas indicações apenas podem ser confirmadas com informações levantadas no local ou a partir de dados oriundos de fiscalização ambiental.

A Tabela 3.4 apresenta os resultados da distância entre pátios encontrada a partir do mapeamento realizado.

A Figura 3.3 ilustra, esquematicamente, exemplos do tamanho de pátio e sua distribuição na estrada de acesso, assim como diferentes distâncias entre pátios.

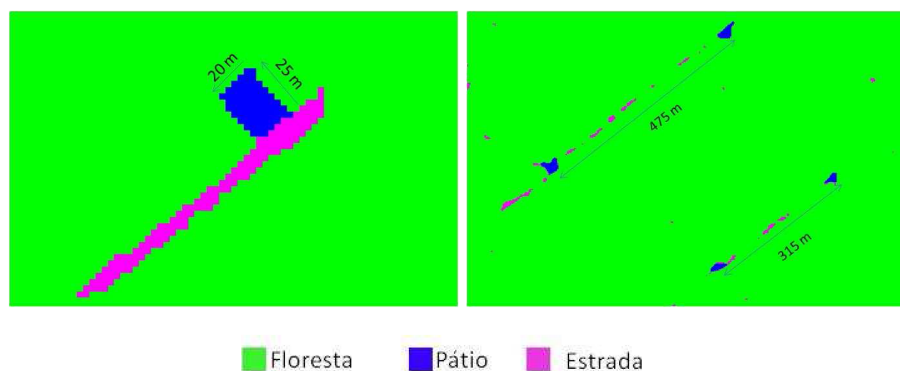


Figura 3.3 - Exemplo de dimensão de pátio e distância entre pátios.

3.3.3 Mapeamento de pátios e estradas

A partir da interpretação visual das imagens HRC foi possível identificar 428 pátios na área de estudo. A alta resolução espacial das imagens aliada às diferenças de contraste entre o alvo de interesse e o restante da imagem, facilitaram a identificação dos pátios, como pode ser visto na Figura 3.4

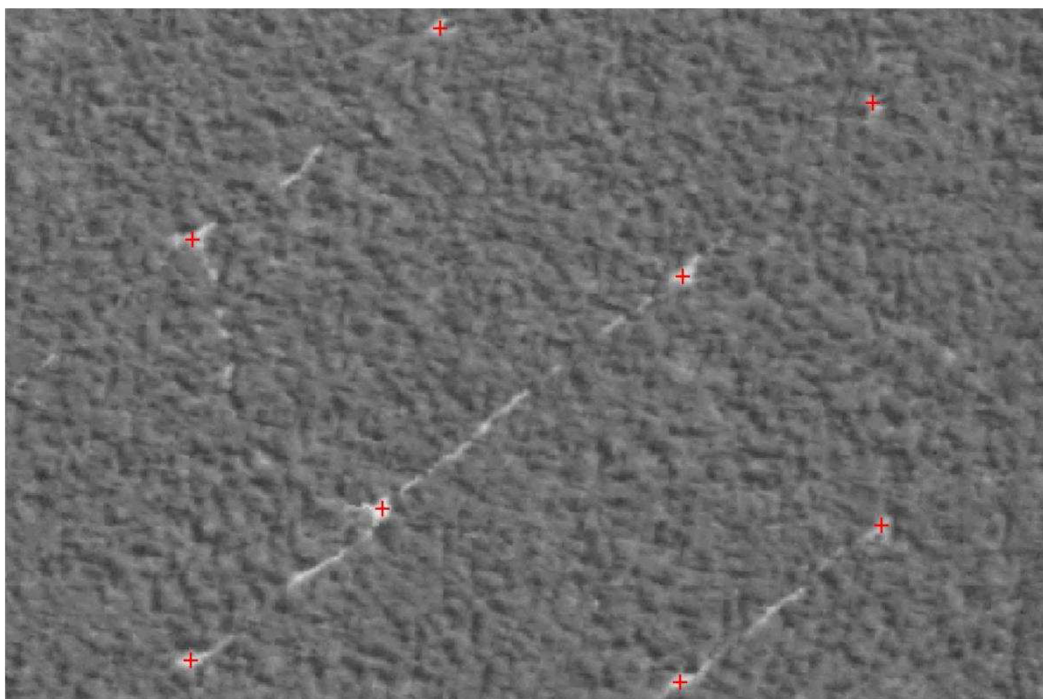


Figura 3.4 - Identificação de pátios (vermelho) a partir da interpretação visual nas imagens HRC/CBERS-2B.

A classificação supervisionada permitiu separar os pátios, estradas e florestas 3.5.

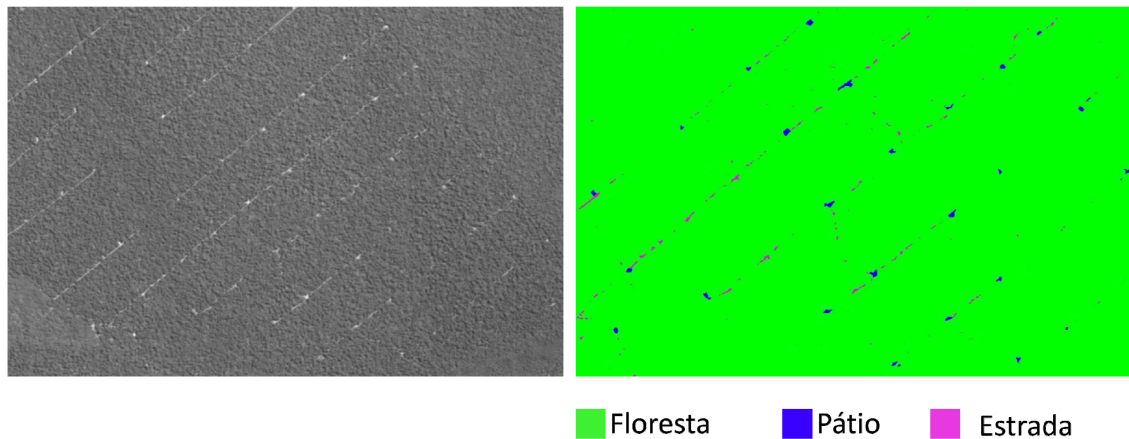


Figura 3.5 - Imagem HRC/CBERS-2B e imagem classificada.

3.3.4 Conclusão

A análise exploratória dos dados HRC/CBERS-2B permitiu identificar com clareza os pátios de estocagem nas áreas de exploração madeireira sob corte seletivo. As imagens de alta resolução são indicadas para uso potencial como fonte de verdade terrestre. Este estudo possibilitou destacar os pátios em meio à floresta, mostrando as características radiométricas - pátio com maior brilho em relação à floresta, e geométricas - tamanho do pátio similar ao pixel de imagem de média resolução (30 metros).

Deste modo, sugere-se testar a potencialidade das imagens de média resolução explorando técnicas de processamento de imagens para detectar pátios explorando diferenças de contraste identificadas neste estudo.

4 ANÁLISE DE DADOS TM/LANDSAT E CCD/CBERS PARA DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE DETECÇÃO DE FEIÇÕES RELACIONADAS AO CORTE SELETIVO

4.1 Introdução

A detecção do corte seletivo de madeira em escala regional é uma das aplicações mais desafiadoras para os dados de sensoriamento remoto, pois a retirada de árvores apresenta respostas altamente variáveis nos danos da copa (espacial e espectralmente), que muitas vezes são confundidas com o dossel intacto.

Como mostrado anteriormente nos capítulos 2 e 3, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto permite destacar espacialmente sinais de implantação de infraestrutura da exploração madeireira (abertura de estradas de exploração florestal e pátios de estocagem de madeira). Geralmente, essa evidência de infra-estrutura revela aspectos importantes do sistema de exploração. A verificação em campo da exploração florestal pode ser complementada por métodos de sensoriamento remoto, os quais funcionam como um mecanismo de regulação e de identificação do sistema de exploração adotado.

Neste sentido, imagens de satélite têm sido usadas para detectar e mapear estradas de arraste e pátios de estocagem, conforme discutido no capítulo 2. No entanto, a aplicação de métodos tradicionais de interpretação visual torna-se complexa para identificar atividade madeireira, devido à complexidade de elementos formados por floresta, floresta degradada e clareiras, fazendo com que técnicas de processamento de imagens mais robustas sejam utilizadas para realçar as feições indicadoras de corte seletivo.

Os estudos de sensoriamento remoto aplicados à detecção de exploração madeireira têm sido realizados com limitações. Muitas dessas limitações se devem ao fato de a detecção do corte seletivo a partir de imagens de média resolução (aproximadamente 30 metros) apresentar inúmeros desafios, por exemplo: i) a abertura de clareiras devido à perturbação natural (ASNER et al., 2002); ii) a abertura do dossel muitas vezes ocorre na escala de sub-pixel, iii) limite de detecção ocorre em até 2-3 anos após a exploração, iv) não há relação direta entre resposta multiespectral e intensidade da exploração (JÚNIOR et al., 2005b).

Estudos relacionados ao mapeamento da exploração madeireira foram conduzidos até o momento visando destacar a ocorrência desta atividade por meio de interpretação visual ou detecção a partir de transformações no solo ou vegetação. Este trabalho propõe um método de realce do corte seletivo explorando as características das feições de tamanho dos pátios e contraste com a vizinhança.

O desenvolvimento da metodologia representa um esforço no sentido de diminuir a interferência humana no processo de mapeamento (escala menor que 1:100.000),

a partir da exploração de dados de média resolução espacial, e reduzir o trabalho de edição vetorial dos dados, seja para delimitar as áreas exploradas ou para corrigir áreas erroneamente incorporadas no processo de interpretação. Neste estudo, as imagens de alta resolução HRC/CBERS foram utilizadas para a caracterização das evidências de atividade madeireira e para a avaliação da classificação.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento mais adequado para detectar corte seletivo testando técnicas de processamento digital de imagens.

4.1.1 Abordagem adotada

O procedimento metodológico adotado baseia-se na premissa de que o manejo florestal apresenta indicadores relacionados à exploração, de maneira que os pátios podem ser detectáveis no contexto da vizinhança por imagens de satélite de média resolução.

Os pátios de estocagem de madeira nas áreas de manejo florestal são construídos de acordo com a Norma de Execução 01/2006, que recomenda o tamanho de até 25 x 25 metros. Além disso, sua disposição deve ser ao longo das estradas secundárias, obedecendo ao critério de localização de maior incidência de árvores exploráveis.

Nas áreas onde ocorre atividade madeireira sem adoção do manejo florestal, há também abertura de pátios de estocagem, porém sem definição dos critérios legais. Desta forma, os pátios podem apresentar dimensão maior e ambos são detectáveis via sensoriamento remoto. A Figura 4.1 apresenta o modelo de detecção do corte seletivo usando imagens TM/LANDSAT com 30 metros de resolução espacial.

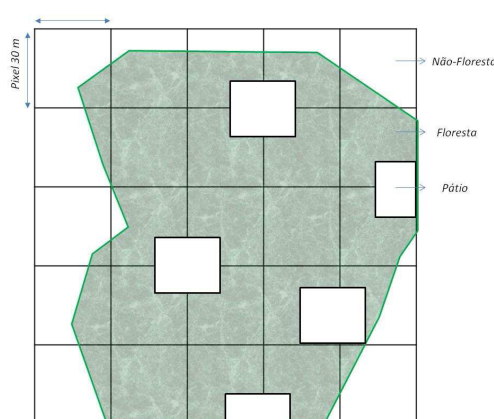


Figura 4.1 - Exemplo esquemático do modelo de detecção do corte seletivo usando imagem TM/LANDSAT.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Área de estudo

A área de estudo 4.2 está localizada na porção norte do estado do Mato Grosso (sul da Amazônia brasileira) e inclui os municípios de Santa Carmen, União do Sul e parte dos municípios de Cláudia, Colíder, Feliz Natal, Itaúba, Nova Santa Helena, Marcelândia, União do Sul, Sinop, Nova Ubitatã, Paranatinga, Sorriso e Vera. Juntos, estes municípios formam o território conhecido como região de Sinop.

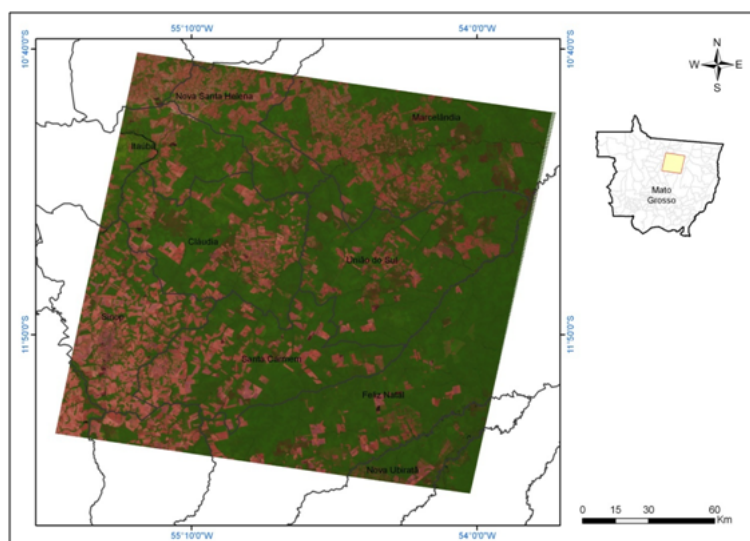


Figura 4.2 - Localização das áreas de estudo e respectivos municípios abrangidos (imagem TM/LANDSAT, órbita ponto 226/068, de 19/08/2008, composição RGB-543).

A região compreende as coordenadas geográficas 55° 10' 00" e 54° 00' 00" de longitude oeste 10° 40' 00" e 11° 50' 00" de latitude sul, cobrindo uma área de aproximadamente 30.000 km², relativa a órbita/ponto 226/68 do sensor TM/LANDSAT.

Nos municípios selecionados há forte presença da indústria madeireira, com áreas de exploração seletiva de madeira nas formações de Floresta Ombrófila, facilitadas pela proximidade de centros processadores e acesso viário (IBGE, 1989); (GRAÇA, 2004).

No Estado do Mato Grosso, não existem grandes variações térmicas ao longo do ano, e o clima quente e úmido condiciona a predominância de temperaturas elevadas, com média anual próxima a 24° C e máximas acima de 34° C (RADAMBRASIL, 1980).

A região norte do Estado do Mato Grosso apresenta os maiores índices de pluviosidade do Estado, com média de 2000 a 3000 mm de chuva por ano, com regime tipicamente tropical. No período seco, que varia de maio a agosto, as chuvas podem

Tabela 4.1 - Imagens TM/LANDSAT, CCD/CBERS e HRC/CBERS utilizadas na pesquisa.

Sensor/Satélite	Órbita/Ponto	Data de Aquisição
TM/LANDSAT	226/68	19/08/2008
CCD/CBERS	166-113	21/08/2008
HRC/CBERS	166-D 113-1	21/08/2008
HRC/CBERS	166-D 113-2	21/08/2008
HRC/CBERS	166-D 113-3	21/08/2008
HRC/CBERS	166-E 113-2	16/09/2008
HRC/CBERS	166-E 113-3	16/09/2008
HRC/CBERS	166-E 113-4	16/09/2008

ser inferiores a 60 mm no mês mais seco, chegando a apresentar uma deficiência hídrica próxima de 200 mm. O período úmido, com duração de outubro a abril, apresenta cerca de 1000 a 1200 mm de excedente hídrico (IBGE, 1989).

4.2.2 Dados de sensoramento remoto

Este trabalho utilizou como fonte primária de informações imagens de sensores orbitais com diferentes resoluções espaciais: TM/LANDSAT (30 metros), CCD/CBERS (20 metros) e HRC/CBERS (2,7 metros) 4.1. As imagens foram obtidas junto à Divisão de Geração de Imagens do INPE (DGI-INPE), sendo consultada através do catálogo eletrônico disponibilizado pela instituição <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>.

As imagens TM e CCD foram usadas na identificação de feições da exploração madeireira, como pátios de estocagem e estradas de arraste. As imagens HRC foram utilizadas na validação da detecção de corte seletivo, por possuírem alta resolução espacial e permitirem melhor visualização dos pátios de estocagem de madeira.

Para a criação do banco de dados geográficos, necessário ao desenvolvimento dessa pesquisa, utilizou-se o programa SPRING.

Definiu-se um projeto com as seguintes características: projeção UTM, zona 21, modelo da Terra WGS 1984, retângulo envolvente delimitado pelas coordenadas 55° 48' 00" e 53° 37' 00" de longitude oeste e 12° 28' 00" e 10° 37' 00" de latitude sul. Foram utilizadas somente as bandas sensíveis a região espectral comum aos sensores TM e CCD, ou seja, as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM e 2, 3 e 4 do sensor CCD, que correspondem às faixas do verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente.

4.2.3 Pré-processamento das imagens

As cenas foram registradas sobre a imagem referência GeoCover, projeção UTM, Datum WGS-84, pixel de 28,5 metros. Foram coletados 21 pontos de controle por

imagem, obtendo erro médio de no máximo um pixel para as imagens TM e CCD, e no máximo 0,5 pixel para as imagens HRC.

A partir das imagens georreferenciadas foi feita a correção dos efeitos atmosféricos, utilizando o método de subtração do pixel escuro ou *Dark Object Subtraction* (DOS), proposto por (CHAVEZ, 1988). O método baseia-se no espalhamento Rayleigh para estimar as condições atmosféricas no momento da aquisição da imagem. A partir de um histograma de frequência, valores de reflectância próximos a zero são encontrados na imagem em áreas de água limpa ou de sombra de nuvens e, a partir da subtração de um valor constante para toda a imagem, a contribuição do espalhamento atmosférico relativo (bruma) é removida das regiões do espectro eletromagnético mais afetadas por estes efeitos (visível e infravermelho próximo). As técnicas de correção atmosférica consistem em minimizar os efeitos de absorção e espalhamento da energia eletromagnética gerados pelas partículas presentes na atmosfera.

Desta forma, foi escolhida uma região de lago como alvo para este procedimento. Os valores utilizados no cálculo de *offset* foram obtidos nas bandas 3, 4 e 5 da imagem TM e 2, 3 e 4 da CCD. A subtração foi realizada em ambiente SPRING, através da operação aritmética apresentada na Equação 4.1.

$$c = Ganho \cdot A + Offset \quad (4.1)$$

Onde: C = imagem resultante; Ganho = valor 1; A = imagem a ser convertida; Offset = valor do Offset de cada banda.

4.2.4 Técnicas de Processamento Digital de Imagens

Com a finalidade de testar métodos que evidenciem a ocorrência de exploração madeireira foram realizados os seguintes processamentos na imagem TM/LANDSAT: Modelo Linear de Mistura Espectral, Razão entre imagem-fração solo e vegetação; Transformação por Componentes Principais, Transformação IHS (Intensidade-Matiz-Saturação) e *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

4.2.4.1 Modelo Linear de Mistura Espectral

Foi aplicado o Modelo Linear de Mistura Espectral conforme descrito em Shimabukuro e Smith (1991), utilizando o aplicativo SPRING. As bandas das imagens TM e CCD foram utilizadas como entrada para o modelo.

De acordo com Shimabukuro e Smith (1991) a resposta de cada pixel é uma combinação da resposta espectral dos componentes existentes na mistura. Através do modelo linear de mistura espectral é possível estimar a proporção dos componentes para cada pixel.

Os pixels puros ou endmembers utilizados como dado de entrada para os modelos foram selecionados diretamente na imagem, através da seleção de pixels com a resposta espectral mais próxima da curva teórica esperada para alvos puros. Os modelos foram gerados independentemente para cada uma das imagens. O pixel puro do componente vegetação foi selecionado em áreas de floresta secundária (capoeira) em virtude do padrão de resposta espectral apresentar mais uniformidade (menor influência de sombra) em relação às áreas de floresta primária. Para o componente solo, o pixel foi selecionado em área de solo exposto, enquanto que para a componente sombra, foi escolhido um pixel relativo a corpos de água pura.

O modelo linear de mistura espectral pode ser escrito conforme Equação 4.2, simulando três componentes: vegetação, solo e sombra.

$$r_i = a \cdot veg_i + b \cdot solo_i + c \cdot sombra_i + e_i \quad (4.2)$$

Onde: r_i = resposta espectral do pixel na banda i ; a = proporção de vegetação; b = proporção de solo exposto; c = proporção de sombra; i = bandas do sensor utilizadas; e_i = valores residuais (pixels não modelados devido às restrições do método) na banda i .

4.2.4.2 Razão entre imagens fração solo e vegetação

As imagens-fração resultantes do modelo de mistura foram utilizadas numa operação aritmética entre as bandas fração-solo e fração-vegetação, conforme Equação 4.3.

$$C = Ganho \cdot (A/B) + Offset \quad (4.3)$$

Onde: C = imagem resultante; $Ganho$ = valor 90 atribuído ao ganho; A = imagem fração solo; B = imagem fração vegetação; $Offset$ = valor 40 atribuído ao $Offset$.

Foi aplicado o realce na imagem resultante, visando aumentar o contraste entre os alvos e acentuar as características relevantes para a identificação do corte seletivo. O contraste é a diferença entre os níveis de cinza médios dos alvos presentes na imagem, e sua manipulação tem como objetivo melhorar a qualidade visual da imagem sem, no entanto, aumentar a quantidade de informação nela contida. Diz-se então que a imagem possui alto contraste, o que facilita a sua visualização e/ou interpretação, seja por um intérprete humano ou um sistema de processamento digital.

Esta técnica utiliza funções matemáticas para modificar os níveis de cinza ou os valores digitais de uma imagem, de modo a destacar certas informações espectrais e melhorar a qualidade visual da imagem, facilitando a análise do intérprete.

A partir das imagens realçadas foi realizada a edição vetorial via interpretação visual

das áreas com indicação de exploração madeireira, seja convencional ou manejada.

4.2.4.3 Transformação por Componentes Principais

Foi realizada a Transformação por Componentes Principais utilizando o aplicativo SPRING. As bandas das imagens TM e CCD foram utilizadas na transformação. A Transformação por Componentes Principais é uma técnica de realce que reduz ou remove a informação redundante presente nas bandas das imagens multiespectrais, ou seja, a análise de bandas individuais pode ser insuficiente devido serem similares visual e numericamente. Esta similaridade ocorre quando há o efeito de sombras resultantes da topografia de determinada região, sobreposição de janelas espectrais entre bandas adjacentes e também por consequência do comportamento espectral dos objetos.

Deste modo, o produto das componentes principais é um novo conjunto de imagens cujas bandas individuais apresentam informações não disponíveis em outras bandas. A Transformação por Componentes Principais é derivada da matriz de covariância entre as bandas e as imagens geradas possuem um valor de pixel que é a combinação linear dos valores originais. A primeira componente principal (PC1) tem a maior variância (maior contraste) e a última, a menor variância.

A transformação das componentes principais é, basicamente, uma rotação dos dados no espaço espectral. Os novos eixos, combinações lineares dos originais, estão orientados de forma que a variância seja maximizada e a correlação entre eixos resultantes seja minimizada. As componentes principais são calculadas a partir da matriz variância e covariância das imagens originais e seus respectivos autovalores e autovetores.

4.2.4.4 Transformação IHS

A técnica de Transformação IHS foi aplicada nas imagens TM/LANDSAT e CCD/CBERS. Esta transformação consiste em realizar uma combinação de imagens no sistema de cores vermelho (R), verde (G) e azul (B), para produzir as componentes: intensidade (I), que representa a energia total envolvida; matiz (H), que representa a cor dominante ou a medida do comprimento de onda médio da luz que foi refletida ou transmitida, e saturação (S), que expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é refletida ou transmitida (GONZALEZ e WOODS, 2000).

No sistema IHS, a distância de um ponto até a base do cone representa a intensidade (I); o raio da base do cilindro representa a saturação (S); e a sequência radial ao redor do círculo de saturação e do eixo de intensidade, o matiz (H). Os valores de intensidade e de saturação variam de 0 a 1, enquanto os valores de matiz estão compreendidos entre os ângulos 0 e 360 graus. Na componente I localizam-se os valores de intensidade, tendo como origem a base do cilindro; na componente S estão os va-

lores de saturação, que sobre a componente I possui valor 0 e sobre a circunferência da seção circular tem máximo valor. O matiz é dado pelo arco na componente H. Em vista desta conformação, este sistema de coordenadas é denominado IHS.

4.2.4.5 Índice de Vegetação

O índice NDVI desenvolvido por Rouse et al. (1973) foi aplicado na imagem TM/LANDSAT. Este índice expressa a diferença entre as faixas do infravermelho próximo e do vermelho, normalizada pela soma das mesmas. O índice de diferença normalizada varia de -1 à +1. Desse modo, os valores NDVI de zero à -1 (resposta do vermelho mais alta que no infravermelho próximo) representam a quase ausência de vegetação. A cobertura vegetal estará sempre no intervalo entre zero e +1 (resposta no vermelho mais baixa que no infravermelho próximo), num gradiente crescente. O índice NDVI é obtido a partir da Equação 4.4.

$$NDVI = (IVP - V)/(IVP + V) \quad (4.4)$$

Onde: IVP = região do infravermelho próximo; V = região do vermelho.

4.2.5 Concepção do método de detecção de pátios

O capítulo 3 mostra que o contraste do pátio de estocagem pode ser percebido em imagens de média resolução, uma vez que se apresenta 57% mais brilhante do que a floresta. Outro atributo derivado da análise com os dados HRC/CBERS-2B é de que a dimensão do pátio é menor do que o pixel da imagem TM/LANDSAT. Portanto, o pátio na imagem TM/LANDSAT é caracterizado por um *pixel* contrastante em relação a sua vizinhança. Desta forma, foi desenvolvido o método detector de pátio baseado no realce destes a partir da análise de contexto do pátio e seu entorno.

Foram desenvolvidas operações que produzem uma imagem da média da vizinhança de cada pixel. Foi também investigado em cada imagem resultante a distribuição de ND do pátio e do seu entorno, com isso pode-se criar uma regra de decisão entre o *pixel* do pátio e o *pixel* da imagem que representa a imagem da vizinhança, conforme os seguintes procedimentos:

4.2.5.1 Análise da distribuição do nível digital de pátios e vizinhança

Após a obtenção das imagens resultantes dos processamentos foi utilizada uma técnica de realce a partir da média da vizinhança, que consiste numa transformação *pixel* a *pixel*, que não depende apenas do nível de cinza de um determinado *pixel*, mas do valor dos níveis de cinza dos *pixels* vizinhos. Desta forma, obteve-se o valor de *pixel* dos pátios de estocagem e dos valores vizinhos, considerando a informação do contexto.

Foi aplicado um operador na imagem para determinar a média da vizinhança, obtendo os valores a partir de uma máscara de 3 linhas por 3 colunas com o centro na posição do pátio. A aplicação deste operador com centro na posição (i,j) , sendo i o número da linha e j o número da coluna sobre a imagem, consiste na substituição do valor do *pixel* na posição (i,j) por um novo valor que depende dos valores dos *pixels* vizinhos, gerando uma nova imagem com a eliminação das linhas e colunas iniciais e finais da imagem.

Para definir os limiares de pátio e não-pátio, foram extraídos os valores dos *pixels* de cada uma das bandas separadamente satisfazendo a análise exploratória nesta etapa do trabalho. Em seguida, identificou-se também o limiar de detecção entre pátio e sua vizinhança em cada uma das imagens resultantes nos processamentos. Foram gerados os histogramas para cada uma das imagens e definido o limiar entre pátio e não pátio.

As figuras 4.3 a 4.7 apresentam os histogramas com o limiar de detecção para cada uma das imagens.

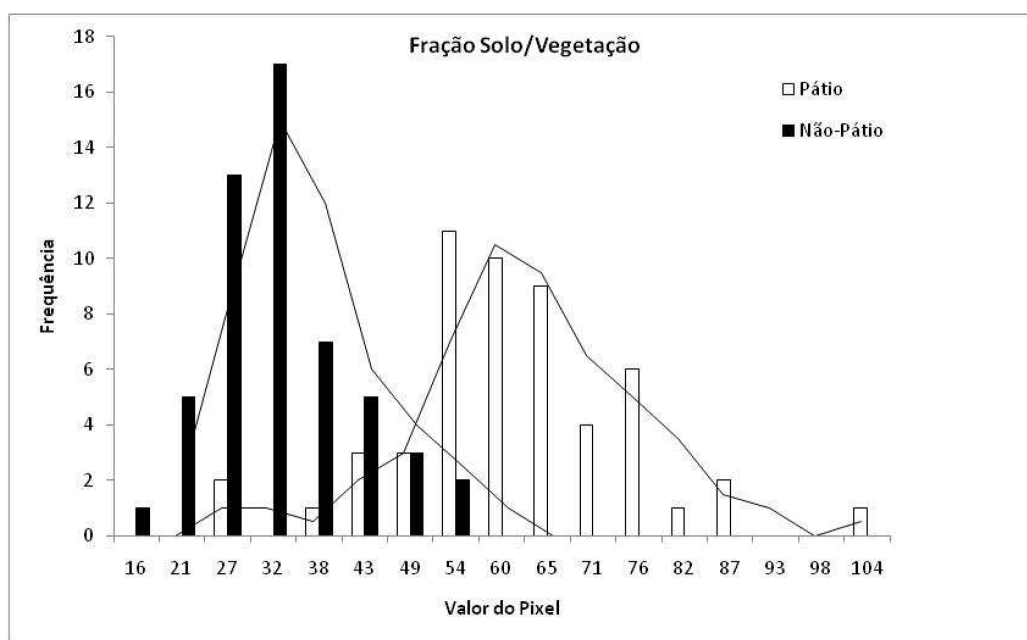


Figura 4.3 - Limiar entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo/vegetação.

A distribuição dos níveis digitais entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo/vegetação mostra que há uma pequena sobreposição entre os valores de pátio e da classe não-pátio, de modo que o valor de *pixel* maior que 49 ND foi definido como o limiar de separação entre as duas distribuições.

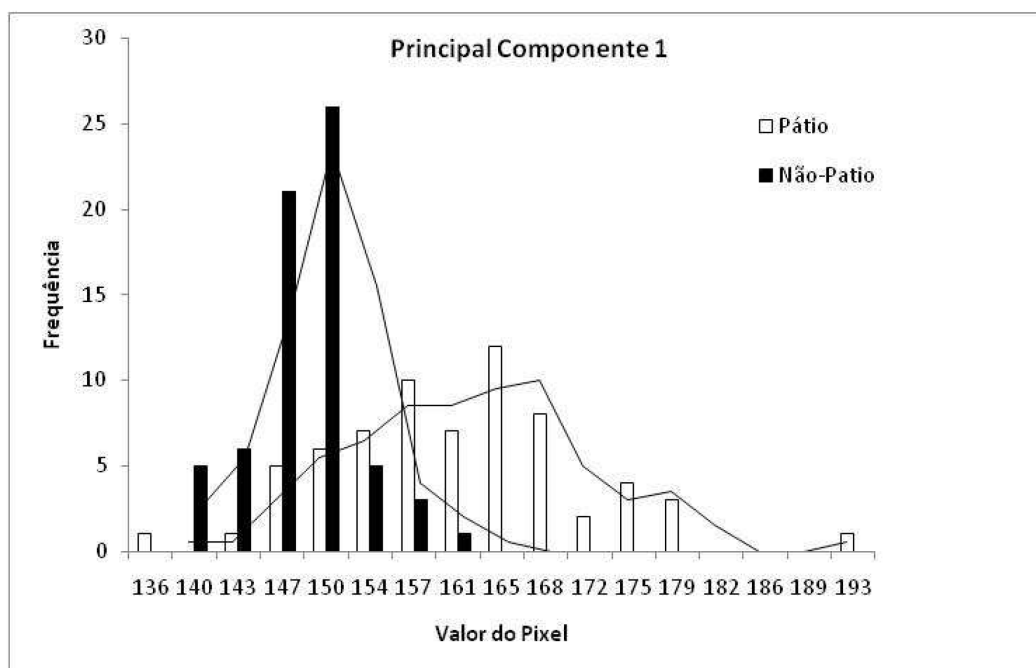


Figura 4.4 - Limiar entre pátio e vizinhança na imagem principal componente 1.

A imagem componente principal 1 apresentou maior sobreposição entre os valores de *pixel* de pátio e não pátio e o limiar de detecção foi estabelecido como maior do que 157 ND.

Para diferenciar pátio da sua vizinhança, a imagem NDVI mostrou boa distribuição. Houve pouca sobreposição entre as duas classes e o limiar de detecção de pátio representa valor menor do que 175 ND.

A distribuição dos níveis digitais entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo também apresenta pequena sobreposição entre os valores de pátio e não-pátio, de modo que o valor de *pixel* maior que 118 ND foi definido como o limiar desta distribuição.

A imagem componente intensidade apresentou bastante sobreposição entre os valores de *pixel* de pátio e não pátio, prejudicando a diferenciação do limiar de detecção. No entanto, foi definido o valor de *pixel* maior do que 70 ND como o limiar para a componente intensidade.

Desta forma, foram geradas imagens detecção pátio e não-pátio a partir da média da vizinhança, sendo desenvolvido em linguagem computacional LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) e baseado no limiar de detecção obtido. O processo foi aplicado em cada uma das imagens resultantes dos processamentos e o pseudo-código da linguagem está descrito a seguir:

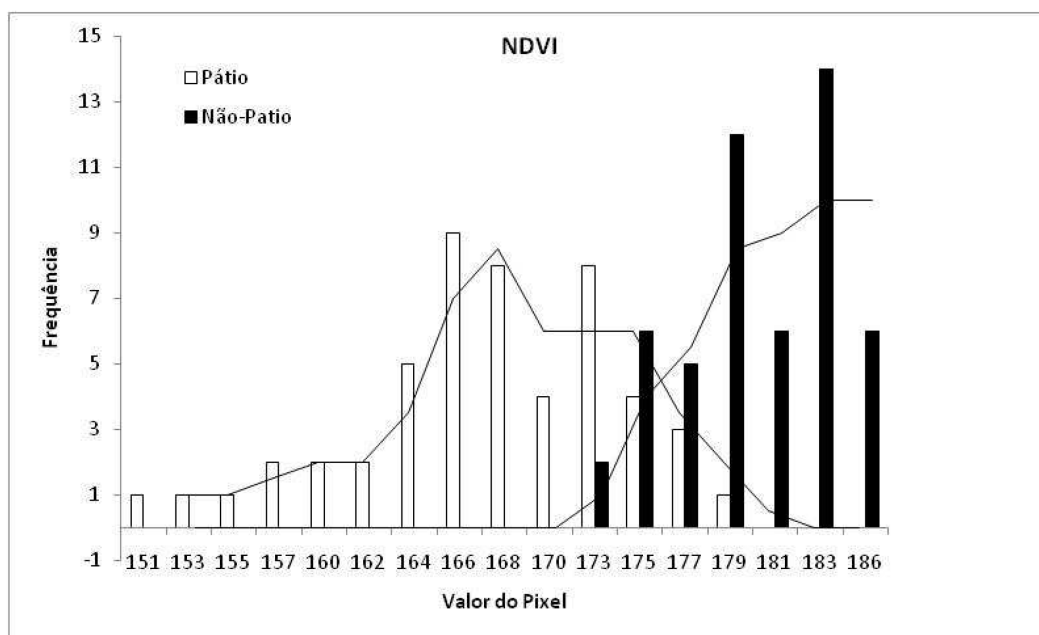


Figura 4.5 - Limiar entre pátio e vizinhança na imagem NDVI.

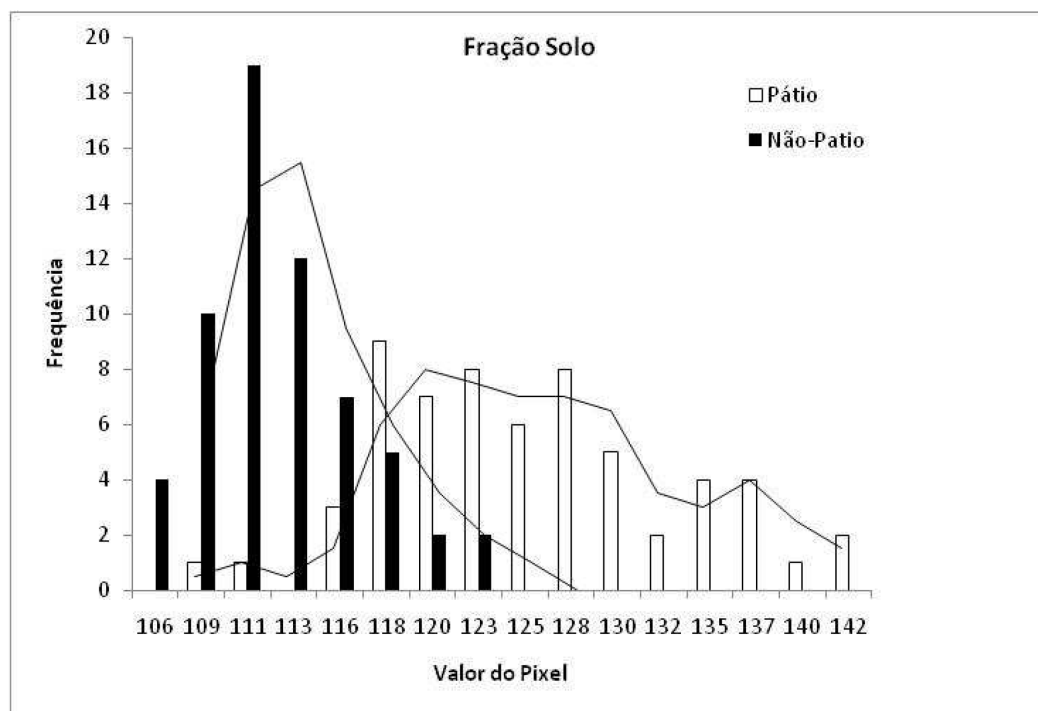


Figura 4.6 - Limiar entre pátio e vizinhança na imagem-fração solo.

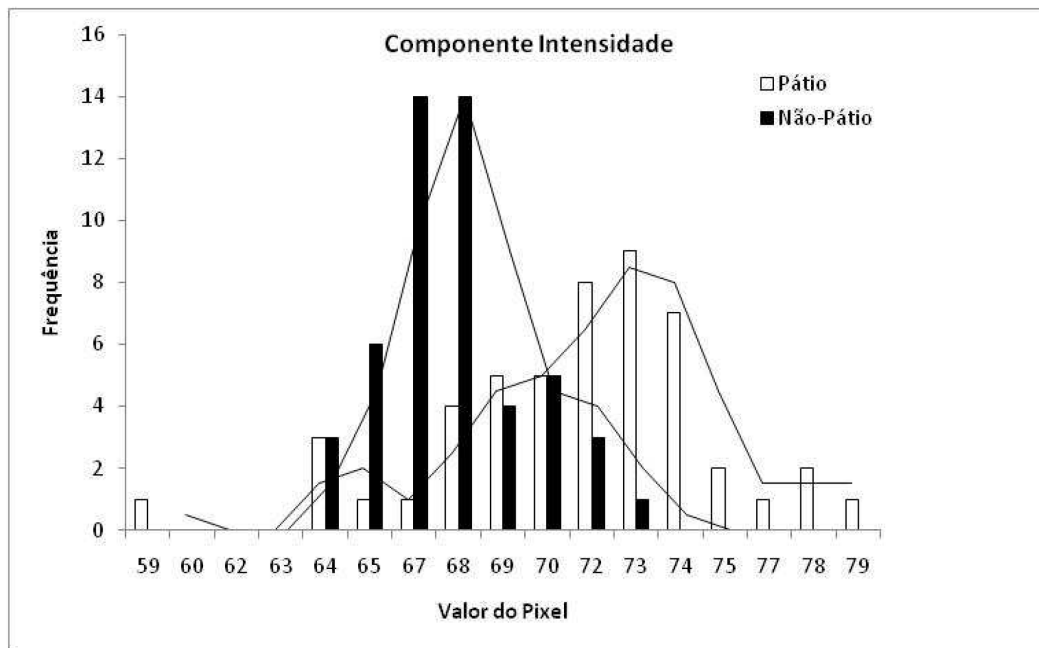


Figura 4.7 - Limiar entre pátio e vizinhança na imagem componente intensidade.

INICIO

Definir imagens transformadas

Aplicar um filtro de média 3x3 na nova imagem

Gerar uma nova imagem com resolução X = 30 metros e Y = 30 metros e em 8 bits

FIM

Em seguida, também foi implementado um operador em linguagem LEGAL para destacar a imagem vizinhança obtida anteriormente cruzando com as imagens resultantes dos processamentos, ou seja, atribuiu-se um valor alto de nível de cinza para os locais indicados como pátios e um valor baixo de nível de cinza para as outras regiões da imagem, aqui denominadas como não-pátio. Um exemplo do pseudo-código criado para gerar a imagem pátio e não-pátio está descrito abaixo:

INICIO

Recuperar imagem processada

Recuperar imagem da média da vizinhança

Gerar uma nova imagem pátio e não-pátio com resolução X = 30 metros e Y = 30 metros e em 8 bits

SE imagem processada for maior que (menor que) 'limiar' E imagem média da vizinhança for menor que (maior que) 'limiar' ENTAO 255 SENA 0

FIM

Em seguida, as imagens foram classificadas em duas classes temáticas: pátio e não-pátio. A partir de cada matriz classificada, procedeu-se a vetorização dos pátios e gerados pontos a partir do centro de massa do vetor para serem usados na validação. Uma máscara de não-floresta foi aplicada a partir dos dados do PRODES e desta forma, foram obtidas as imagens temáticas com as classes: não-floresta, pátio e não-pátio.

4.2.5.2 Comparação com verdade terrestre

Pátios identificados visualmente nas imagens HRC, resolução de 2,7 metros, serviram de referência terrestre e foram utilizados para verificar as imagens classificadas. Definiu-se uma distância dos pátios de 120 metros aplicando um *buffer* para considerar erros de posicionamento do sensor.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Operação aritmética entre bandas

A aplicação do modelo linear de mistura espectral possibilitou a geração de imagens-fração de vegetação, solo e sombra. A razão das imagens-fração solo e vegetação permitiu identificar a equação que apresentou melhor resultado visual para detectar os pátios de estocagem de madeira e estradas de acesso. Neste processo foram testados diferentes valores para ganho e *offset* nas imagens, de modo que a Equação 4.2 foi a mais adequada para visualizar corte seletivo. As imagens fração do modelo de mistura aplicadas nesta equação geraram um produto que realçou os locais de pátios de estocagem e estradas de arraste, permitindo extrair indicadores da infra-estrutura de corte seletivo. As imagens-fração obtidas na aplicação do modelo de mistura e a razão entre as frações solo e vegetação estão apresentadas na Figura 4.8.

A Figura 4.9 apresenta as áreas de corte seletivo que foram delimitadas a partir da interpretação visual. Os polígonos representam regiões em que há pressão por atividade madeireira, contudo, não foram utilizados para obter estimativa de área, uma vez que este não foi o objetivo do estudo.

As áreas delimitadas a partir da interpretação visual sofrem interferência humana, ou seja, podem variar de um interprete para outro e requer bastante experiência para identificar a exploração madeireira, que diferentemente do corte raso possui outro padrão e que pode ser confundido com outro tipo de degradação como o fogo, por exemplo.

Além disto, a interpretação visual requer o esforço da edição vetorial, que em termos de programas de monitoramento para a Amazônia requer a análise de aproximadamente 215 cenas, dificultando a operacionalidade da detecção do corte seletivo.

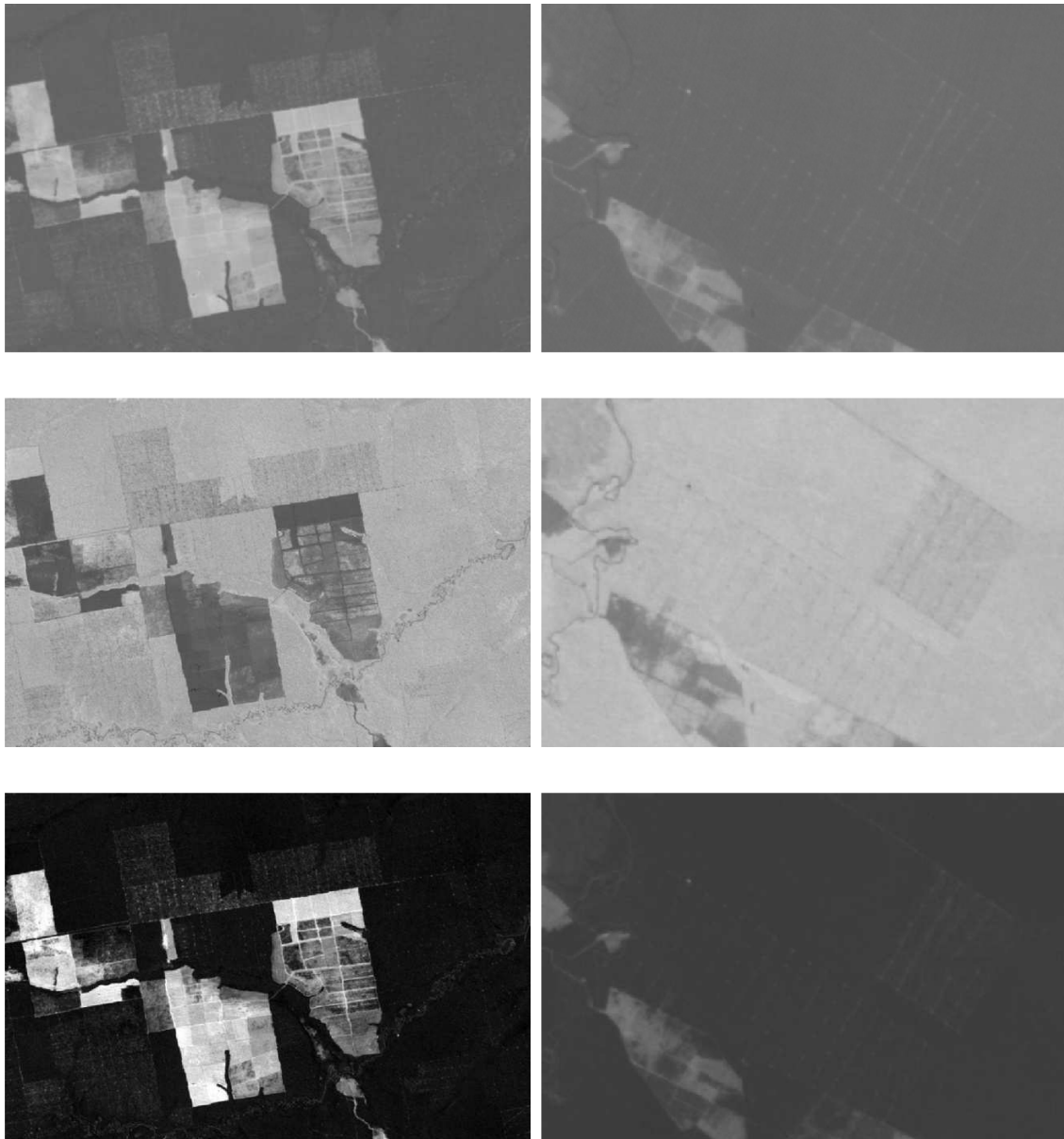


Figura 4.8 - Imagem fração solo, fração vegetação e imagem razão solo/vegetação, respectivamente para as imagens TM/LANDSAT (à esquerda) e CCD/CBERS (à direita)

4.3.2 Análise Qualitativa

Foram obtidas imagens detecção de pátio e não-pátio a partir da média da vizinhança para i) imagem-fração solo/vegetação; ii) PC1; iii) NDVI; iv) imagem-fração solo e v) Imagem Intensidade, a partir do método desenvolvido em linguagem computacional legal e baseado no limiar de detecção obtido.

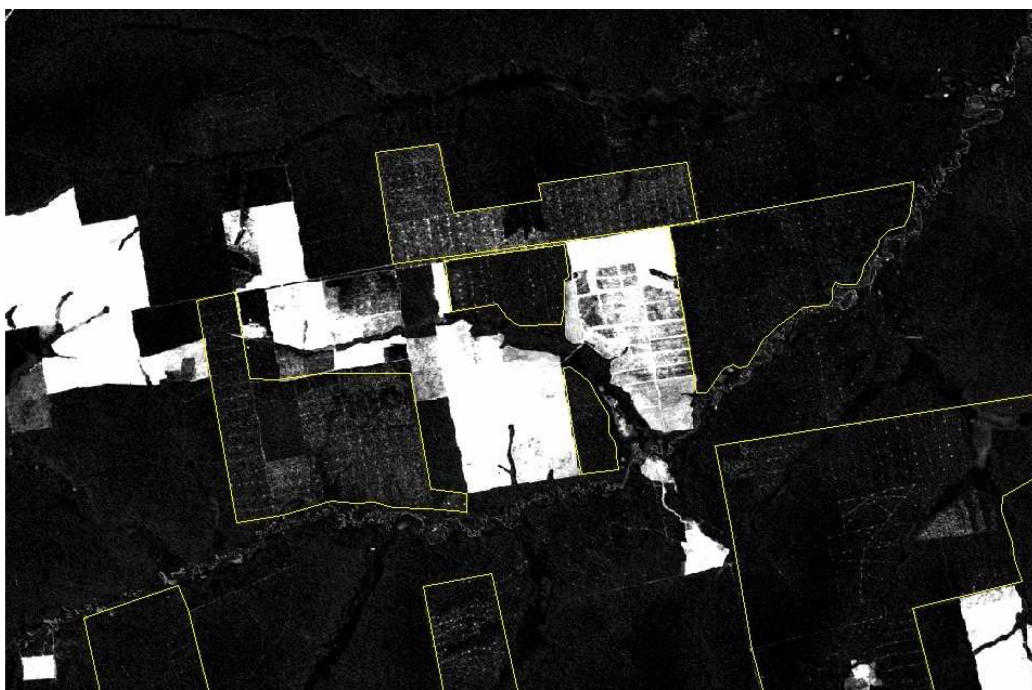


Figura 4.9 - Áreas sob exploração seletiva de madeira.

As Figuras 4.10 a 4.14 ilustram as imagens obtidas a partir dos processamentos realizados e os resultados das imagens realçadas. Pode-se observar que, as imagens realçadas pelo método proposto apresentam regiões destacadas como pátios de estocagem, apresentando nível de cinza igual a 255, enquanto que as regiões definidas como não-pátio possuem nível de cinza igual a 0. Esta decisão nos valores atribuídos visou destacar áreas com ocorrência de exploração madeireira. Com relação à detecção de pátios, percebe-se visualmente que todas as imagens tendem a identificar outras classes como estradas e determinadas áreas abertas. As imagens componente intensidade, fração solo e componente principal 1 apresentaram maior detecção de estradas, quando comparadas visualmente com as demais imagens.

A imagem fração solo/vegetação destacou os pátios facilitando a interpretação visual, porém a detecção não evidenciou os pátios de forma eficiente, quando comparado com as demais imagens resultantes do processamento de detecção de pátios, como pode ser visto nas figuras 4.11.

A imagem derivada da componente principal 1 destacou bastante os pátios e também as estradas, no entanto, áreas desmatadas também foram identificadas causando confusão no detector de pátios.

A imagem derivada do índice NDVI assim como a imagem fração solo mostrou boa detecção dos pátios, com menor identificação de estradas quando comparada com a



Figura 4.10 - Imagem fração solo/vegetação e imagem detecção de pátio derivada da fração solo/vegetação.

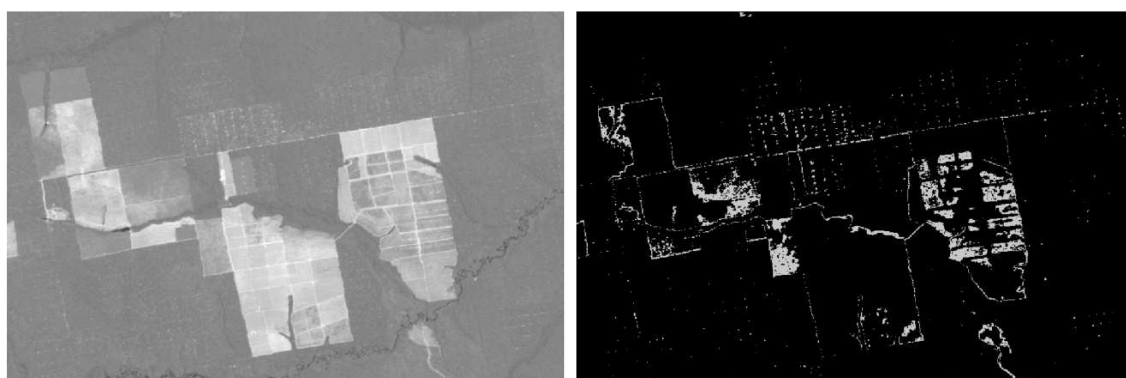


Figura 4.11 - Imagem PC 1 e imagem detecção de pátio derivada da PC 1.



Figura 4.12 - Imagem NDVI e imagem detecção de pátio derivada do NDVI.

imagem resultante da componente principal 1.

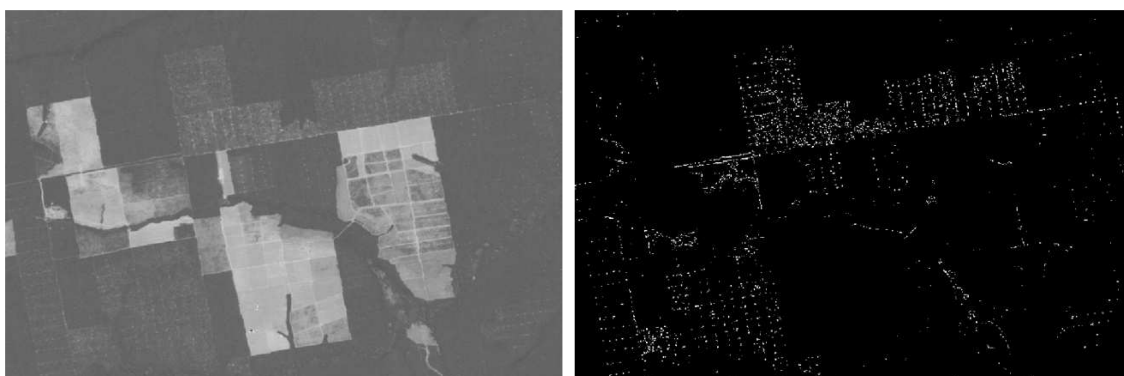


Figura 4.13 - Imagem fração solo e imagem detecção de pátio derivada da fração solo.

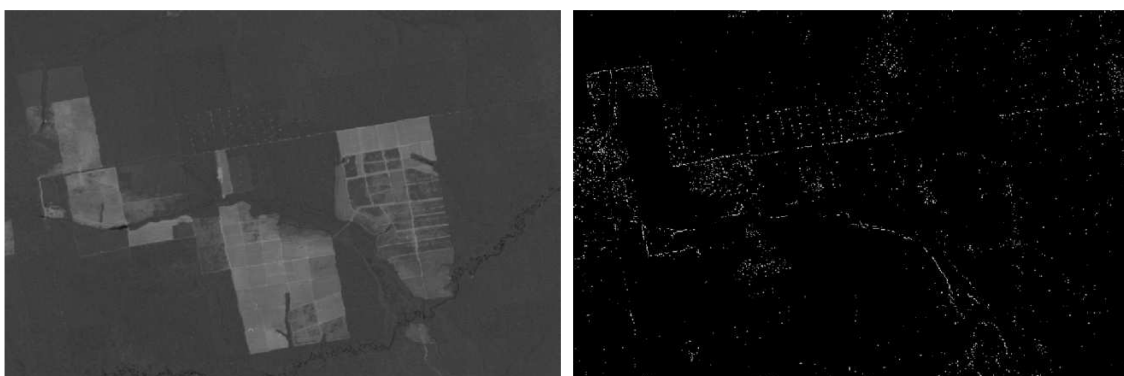


Figura 4.14 - Imagem componente intensidade e imagem detecção de pátio derivada da componente intensidade.

A análise visual da imagem resultante da componente intensidade mostra que este resultado foi o menos adequado para a detecção, devido sua característica de brilho ter realçado diferentes alvos na imagem, identificando classes de não-pátio erroneamente.

A máscara aplicada com os dados do PRODES diminuiu a confusão com estradas, hidrografia e áreas abertas que haviam sido mapeadas na imagem pátio e não pátio. Deste modo, obtiveram-se novas imagens com ausência destas classes. A Figura 4.15 apresenta as imagens geradas e o detalhamento com as áreas de exploração madeireira.

O resultado do uso do detector de pátio após a aplicação da máscara com os dados do PRODES retirou as áreas desmatadas erroneamente classificadas como pátio. As áreas de ocorrência de pátio permitiram indicar regiões de intensidade de corte seletivo.

Tabela 4.2 - Avaliação da detecção de pátios.

	SL*	PC1	NDVI	SOLO	I**
Número de alertas de pátios	8.391	11.262	5.874	7.665	51.362
Pátios corretamente detectados	161	181	190	215	224
Pátios não detectados	137	117	108	83	74
Falsos positivos	8.230	11.145	5.684	7.450	51.138
Total de acertos (%)	54,07	60,74	63,75	72,15	75,17
Erros de inclusão (%)	98,09	98,40	96,76	97,20	99,56

Fração solo-vegetação* *Componente Intensidade*

4.3.3 Análise Quantitativa

Para efeito da avaliação, utilizou-se 298 pontos de pátios identificados nas imagens HRC e considerados neste estudo como verdade de campo. Os pontos de pátios nas imagens HRC foram cruzados com os pontos de pátios nas imagens resultantes. A tabela 4.2 apresenta o número de acertos para cada uma das imagens.

Pode-se observar que, os valores obtidos estão entre 54% a 75% de acertos na identificação de pátios, o que indica uma boa qualidade das imagens para o caso em análise, ou seja, detectar pátios de estocagem. No entanto, todas as imagens apresentaram alta frequência de erros de inclusão correspondentes a confusão com estradas, hidrografia e também áreas abertas. Estes erros podem ser desconsiderados fazendo uso de interpretação visual, uma vez que as áreas de exploração madeireira ocorrem em agrupamentos na floresta e são facilmente identificáveis nestas imagens pátios e não-pátios.

Por meio de uma análise qualitativa dos resultados apresentados na 4.2, pode-se considerar que a imagem fração solo apresentou melhor detecção de pátio e não-pátio, uma vez que obteve um dos melhores percentuais de acerto (72%) e apresentou um dos menores resultados de falso positivo (97%) correspondendo principalmente a estradas. Este resultado, apesar de alto, não se mostrou distribuído espacialmente por toda a imagem, como o caso da imagem intensidade.

Por meio de uma análise qualitativa dos resultados apresentados na Tabela 1, pode-se considerar que a imagem fração solo apresentou melhor detecção de pátio e não-pátio, uma vez que obteve um dos melhores percentuais de acerto (72%) e apresentou um dos menores resultados de falso positivo (97%) correspondendo principalmente a estradas. Este resultado, apesar de alto, não se mostrou distribuído por toda a imagem, como o caso da imagem intensidade.

A classificação temática de cada uma das imagens utilizadas está apresentada nas Figuras 4.16 a 4.20. Áreas com ocorrência de pátios anteriormente identificadas por

meio de interpretação visual (Capítulo 3) foram definidas para avaliar o resultado da classificação, de modo que estão representadas esquematicamente como: círculo vermelho - área 1, círculo amarelo - área 2, círculo azul - área 3, círculo branco - área 4 e círculo preto - área 5.

O mapeamento de pátios a partir da classificação da imagem principal componente 1 teve resultados semelhantes à imagem fração solo/vegetação, mapeando apenas 60% dos pátios verificados, conforme apresentado na Tabela 4.2. No entanto, esta classificação incluiu poucas estradas e rios no mapeamento.

A classificação da imagem NDVI permitiu mapear todas as cinco áreas analisadas, ao contrário das duas classificações anteriores. Esta classificação foi mais vantajosa no sentido de apresentar menos falsos positivos do que as demais classificações, com 5.684 pátios erroneamente classificados 4.2, sendo estes confundidos com rios, conforme pode ser visto próximo à área 4. Houve 63% de acertos dos pátios.

A imagem fração solo permitiu classificar 72% dos pátios, com todas as áreas destacadas sendo identificadas pelo detector de pátios. Os erros de inclusão relacionaram-se em sua maioria à confusão de não-pátios na área 1 e também algumas estradas mapeadas, contudo esta classificação foi a que apresentou o segundo menor erro de inclusão (97%), que podem ser corrigidos a partir do cruzamento de uma base de estradas.

O mapeamento de pátios a partir da classificação da imagem componente intensidade apresentou o pior resultado quando comparado com os demais, pois apesar de ter o maior acerto no total de pátios detectados (75,17%), houve bastante erro de inclusão (99,56%), de modo que a classificação indicou quase a totalidade de pátios detectados como falsos positivos.

4.3.4 Conclusão

A comparação visual das imagens antes e após a aplicação da metodologia empregada permite identificar áreas com ocorrência de exploração madeireira evidenciada a partir do realce de pátios de estocagem proposto neste estudo, que mostrou que 54% a 75% dos pátios foram identificados pelas diferentes técnicas. Embora a abordagem empregada tenha resultado em altos erros de inclusão, ainda se justifica a utilização da técnica para indicar locais de exploração e auxiliar no processo de interpretação visual. O uso de SIG incorporando informações de vias de acesso presente na área de estudo associado à análise poderia diminuir os erros de inclusão encontrados.

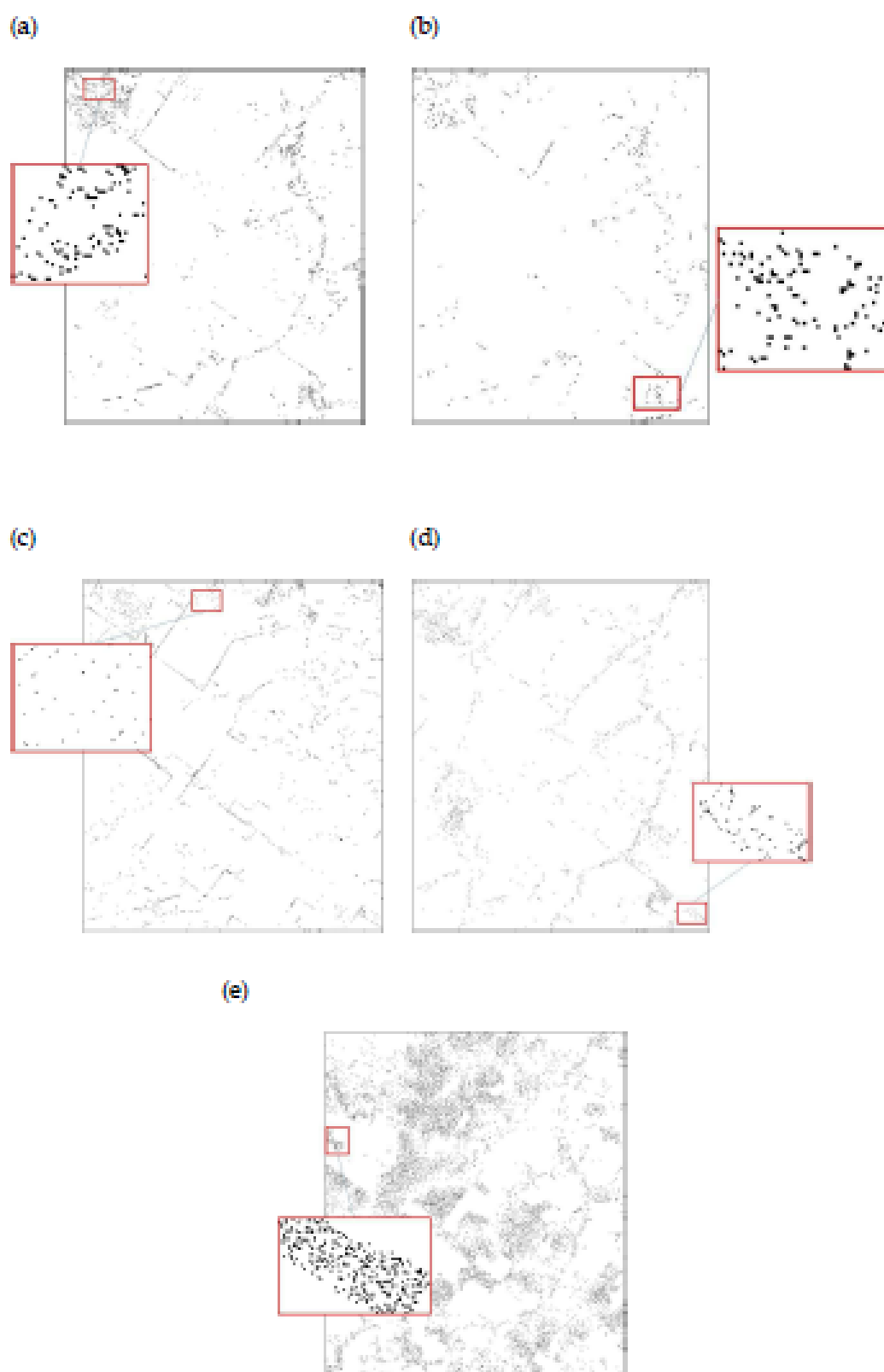


Figura 4.15 - Imagem detecção de pátios baseado na fração solo/vegetação (a), fração solo (b), PC1 (c), NDVI (d) e Intensidade (e) com máscara do PRODES e detalhe (em vermelho) de áreas de ocorrência de pátios.

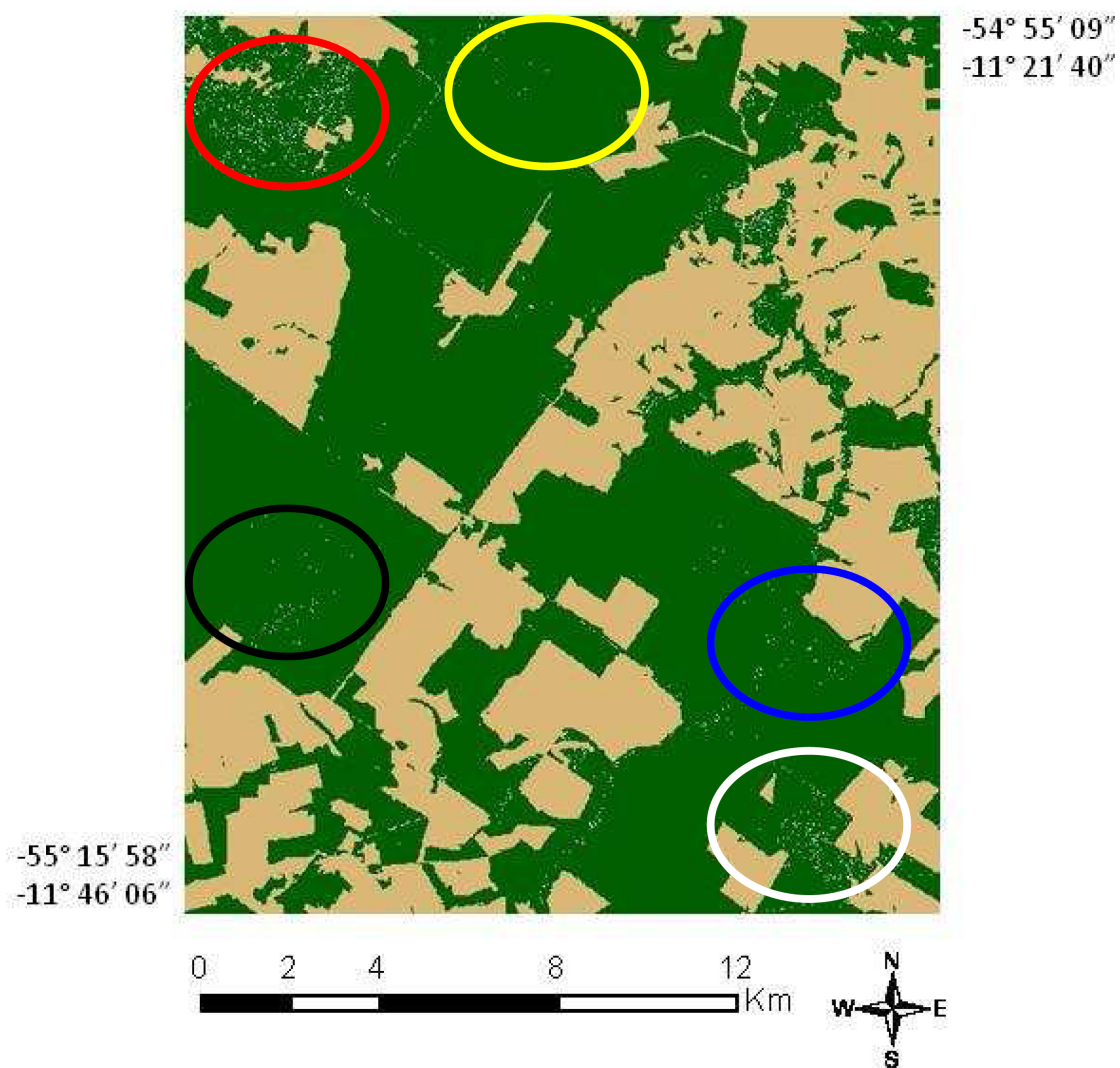


Figura 4.16 - Resultado da classificação temática baseada na imagem razão da fração solo/vegetação.

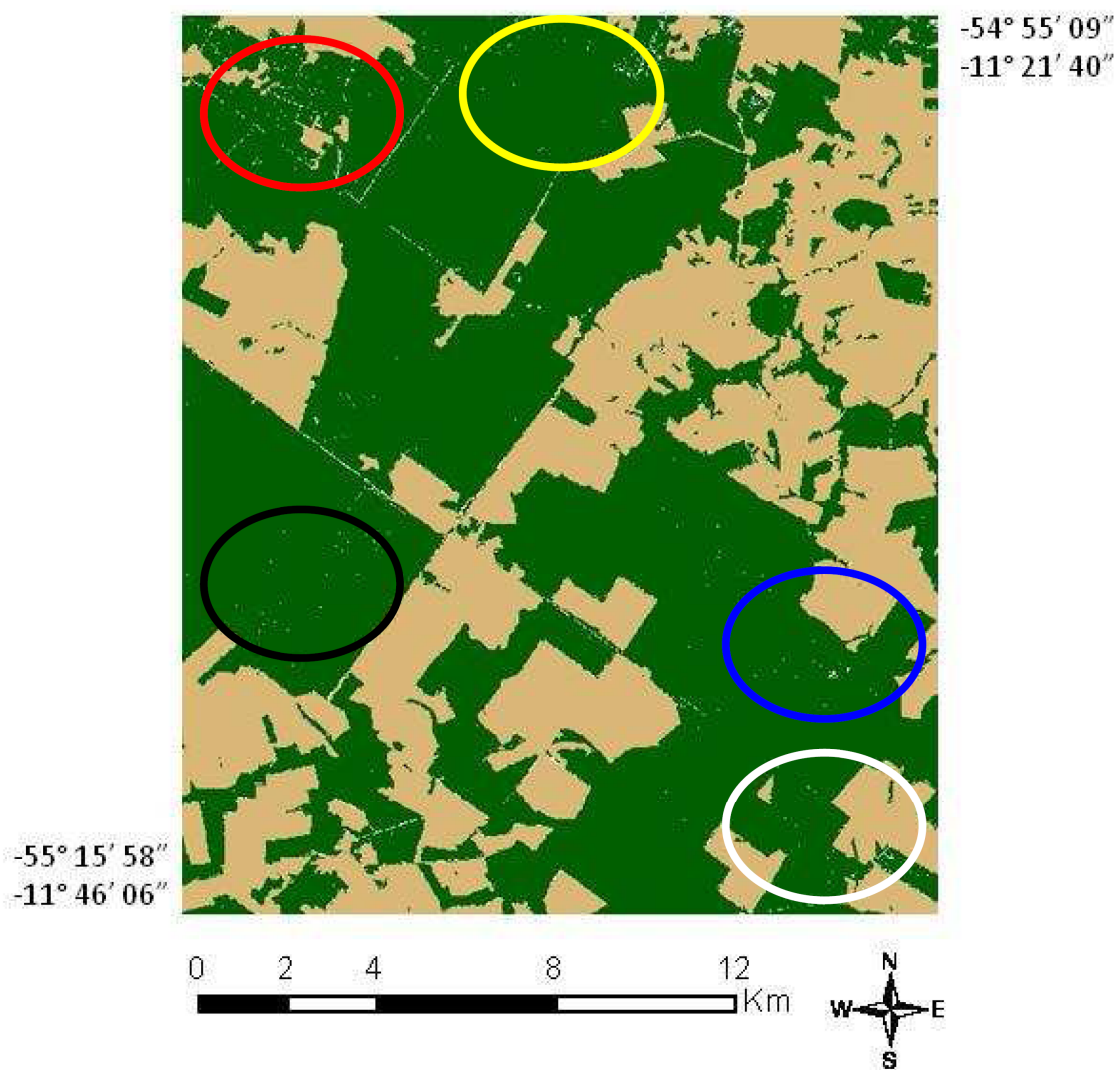


Figura 4.17 - Classificação temática baseada na imagem componente principal 1.

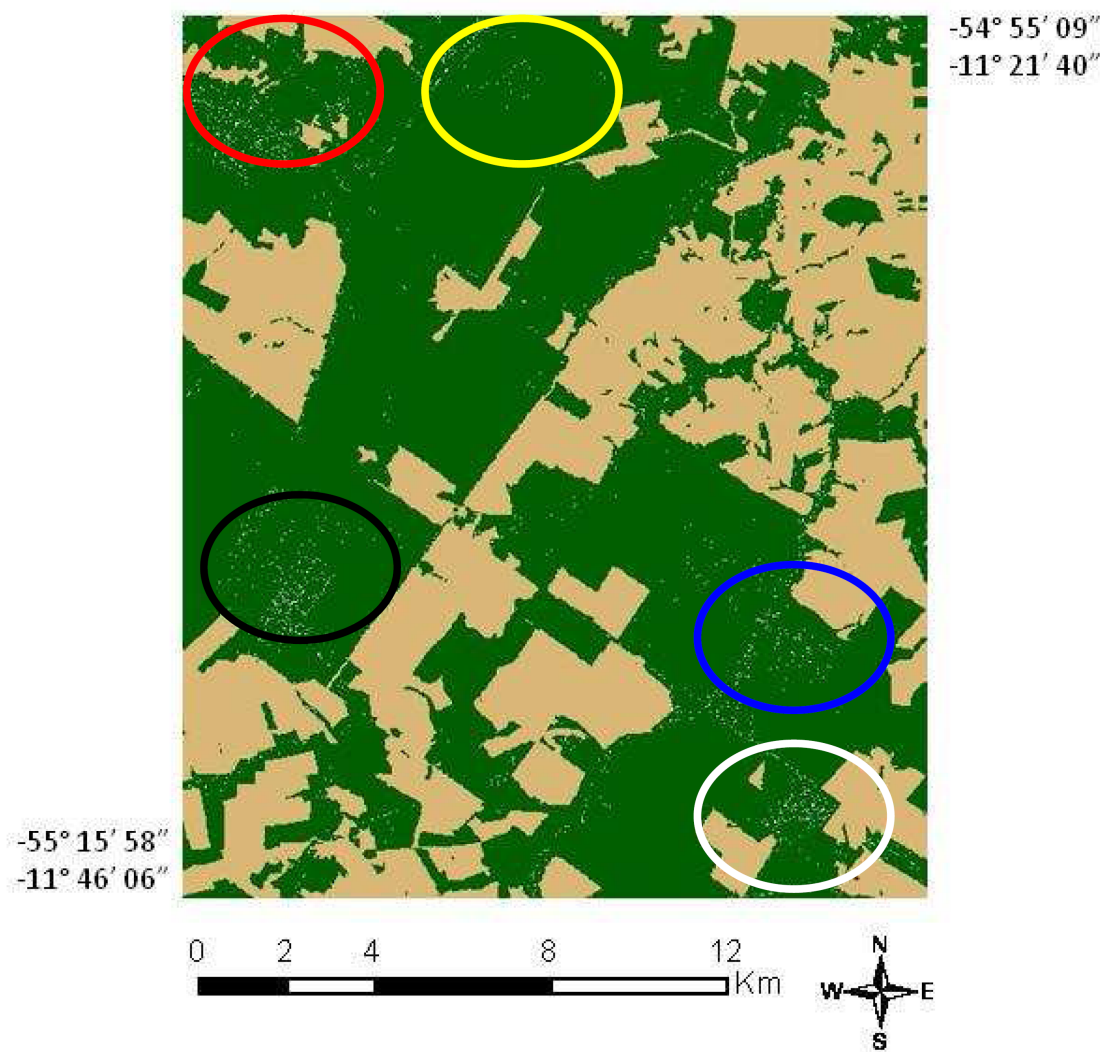


Figura 4.18 - Classificação temática baseada na imagem NDVI.

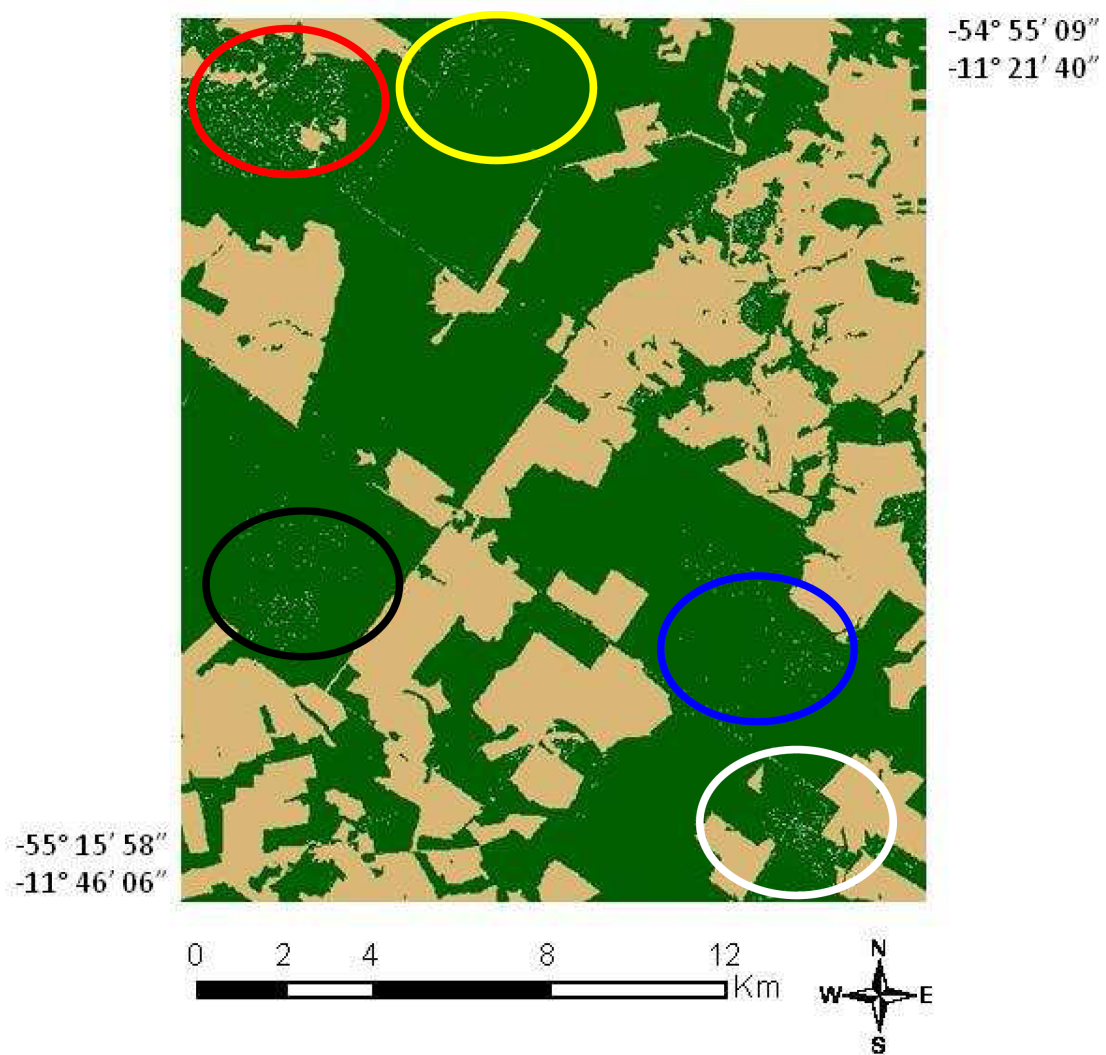


Figura 4.19 - Classificação temática baseada na imagem fração solo.

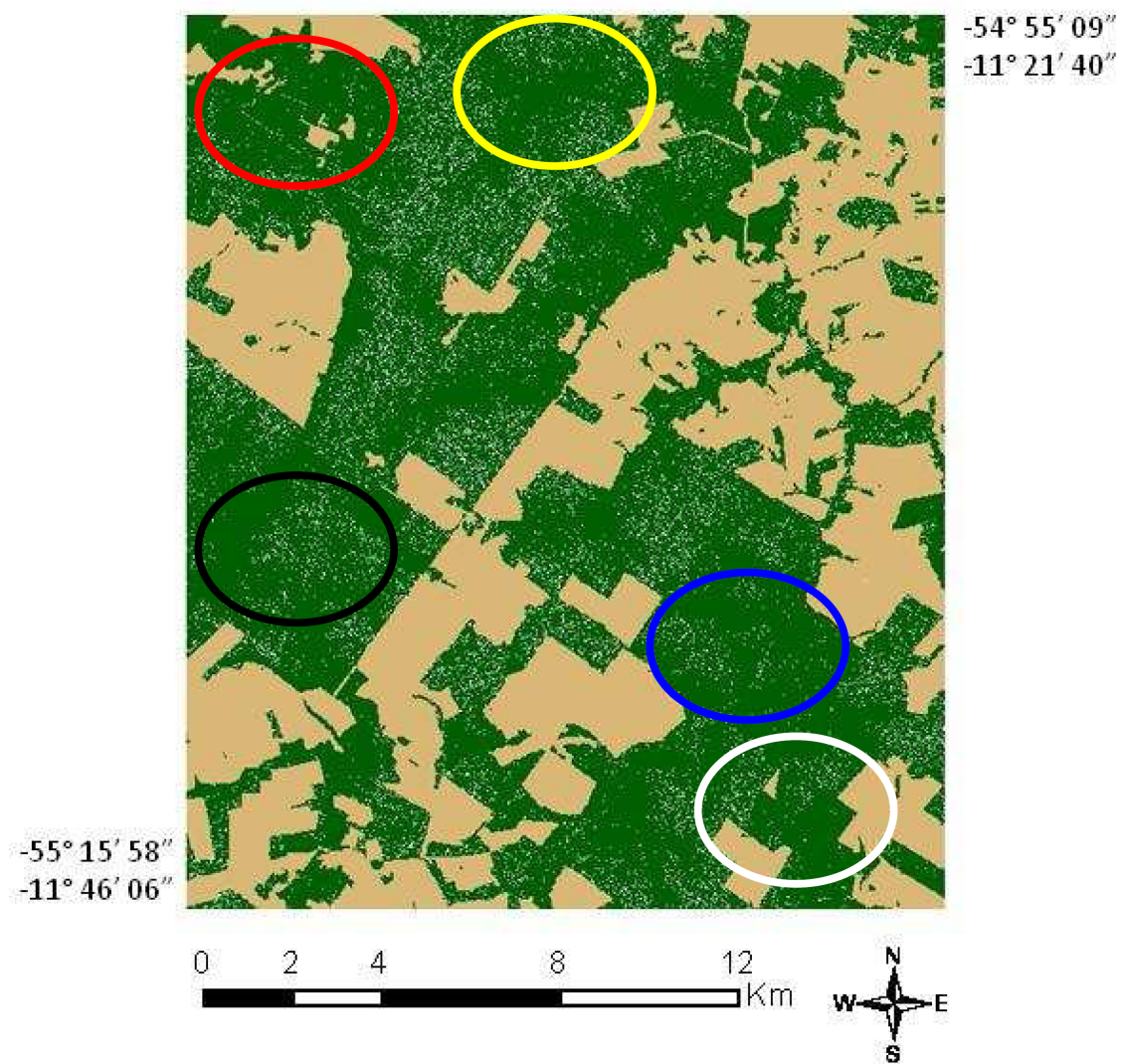


Figura 4.20 - Classificação temática baseada na imagem componente intensidade.

5 CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa desenvolveu uma metodologia para detectar padrões de corte seletivo de madeira a partir da investigação da eficiência de técnicas de processamento digital de imagens para subsidiar mapeamentos de áreas sobre exploração madeireira na Amazônia.

A metodologia proposta a partir da análise exploratória com os dados de alta resolução permitiu a identificação de feições características de áreas estudadas. Os pátios de estocagem têm padrão mais brilhante em meio à floresta e suas características geométricas foram mapeadas em imagens TM/LANDSAT realçadas com a metodologia proposta.

Os avanços decorrentes dessa pesquisa foram:

- a) Os pátios de estocagem de madeira são 57% mais brilhantes do que a floresta e esta feição foi mapeada numa distância de 30 metros, justificando o uso de imagens de média resolução para detectar esta atividade;
- b) Os pátios possuem em média 380 m² e estão distribuídos numa distância de em média 460 metros na área de estudo em questão. Estas informações são indicadoras de manejo florestal;
- c) As técnicas de processamento de imagens TM/LANDSAT exploradas nesta pesquisarealçaram as feições de corte seletivo a partir do limiar de detecção obtido neste trabalho;
- d) A imagem fração solo apresentou melhor detecção de pátio e não-pátio, com 72% de acerto comparado com a verdade terrestre;

Esta pesquisa, além de gerar resultados promissores ao explorar a abordagem de detectar os pátios a partir da informação de contexto obtida no limiar entre pátio e floresta, estimula possibilidades de trabalhos futuros, focando na ampliação da análise exploratória dos dados de alta resolução e técnicas de processamento de imagens, e principalmente aperfeiçoando o detector de pátios desenvolvido neste estudo.

Dentre essas possibilidades, sugere-se:

- a) Aplicar a metodologia para outras áreas de estudo com menor intensidade de corte seletivo, avaliando os acertos na detecção;
- b) Utilizar dados de inventários florestais e perímetros de áreas de manejo florestal para refinar a quantificação do tamanho dos pátios e fazer referências aos pátios que não se enquadram nas dimensões recomendadas pela legislação;

- c) Considerar o tempo de duração das atividades de exploração madeireira;
- d) Refinar a metodologia para evitar ou diminuir pátios falsos positivos detectados a partir da classificação.

Por fim, para continuidade deste estudo recomenda-se a iniciativa de uma rede de colaboração científica entre diferentes autores para desenvolver uma comparação metodológica das técnicas aplicadas e utilizando múltiplos sensores, tendo como base os dados HRC/CBERS-2B como referência para a validação. Esta comparação poderá concluir características em comum e também complementares entre as diferentes técnicas com a finalidade de definir um conjunto de propostas para avanço da metodologia de detecção de corte seletivo.

O desenvolvimento de uma linha de pesquisa em parametrização de impactos na biomassa e definição de parâmetros biofísicos a partir de imagens de satélite poderá utilizar resultados gerados com os avanços da metodologia de corte seletivo visando identificar a intensidade de áreas de exploração madeireira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. **Imaging spectroscopy**: Interpretation based on spectral mixture analysis. Remote geochemical analysis, c. m. englert and p. a. j. englert, eds. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990. 145-166 p. 16
- ARAGÃO, L. E.; GRAÇA, P. M. L. A.; RIVERA-LOMBARD, R. J.; KRUG, T. Utilização de técnicas de classificação digital de imagens landsat tm-5 na identificação de áreas florestais afetadas pela extração seletiva de madeira: parte baixa do rio capim, pa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu - Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBSR, 2001. 13
- ASNER, G. P.; KELLER, M.; PEREIRA, R.; ZWEEDE, J. C. Remote sensing of selective logging in amazonia - assessing limitations based on detailed field observations, landsat etm+, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 3, p. 483–496, 2002. 13, 31
- ASNER, G. P.; KELLER, M.; PEREIRA, R.; ZWEEDE, J. C.; SILVA, J. N. M. Canopy damage and recovery after selective logging in amazonia: Field and satellite studies. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 280–298, 2004. 13, 15, 16
- ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, P. J. C.; KELLER, M.; SILVA, J. N. Selective logging in the brazilian amazon. **Science**, v. 310, n. 5747, p. 480–482, 2005. 1, 2, 13, 16
- BARROS, A. C.; UHL, C. Logging along the amazon river and estuary: patterns, problems and potential. **Forest Ecology and Management**, v. 77, n. 1/3, p. 87–105, sept 1995. 5
- BRASIL. Instrução normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006. dispõe sobre os procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de planos de manejo florestal sustentável - PMFS nas florestas primitivas na Amazônia Legal. **Lex** — Ministério do Meio Ambiente, 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/in05_manejo_florestal.pdf>. 10
- _____. Plano anual de outorga florestal 2010. **Lex** — Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro, p. 96, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/in05_manejo_florestal.pdf>. 10, 11
- 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. 459–479, 1988. 35

COCHRANE, M. A.; ALENCAR, A.; SCHULZE, M. D.; SOUZA, C. M.; NEPSTAD, D. C.; LEFEBVRE, P.; DAVIDSON, E. A. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1832–1835, 1999. 5

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SANTOS, J. R.; SILVA, P. G. Técnicas de processamento de imagens e de análise espacial para estudo de áreas florestais sob a exploração madeireira. **Revista Árvore**, v. 28, n. 5, p. 699–706, 2004. 13, 14

FAO. **Faostat Forestry Data 2005**. 2005. 2009 february. Disponível em: <<http://apps.fao.org/page/collections?subset=forestry>>. 6

FEARNSIDE, P. M. Biodiversity as an environmental service in brazil's amazonian forests: risks, value and conservation. **Environmental Conservation**, v. 26, p. 305–321, 1999. 11

FRUMHOFF, P. C. Conserving wildlife in tropical forests managed for timber. **Bioscience**, v. 34, p. 456–464, 1995. 10

GERWING, J. J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern brazilian amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 157, n. 1/3, p. 131–141, march 2002. 6

GOFC-GOLD. **Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting**. Canadá: [s.n.], 2002. 11, 12

GRAÇA, P. M. L. A. **Monitoramento e caracterização de áreas submetidas à exploração florestal na Amazônia por técnicas de detecção de mudanças**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. xv, 1, 2, 13, 14, 15, 33

GRAÇA, P. M. L. A.; SANTOS, J. R.; SOARES, J. V.; SOUZA, P. E. U. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte de mato grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia - Brasil. **Anais...** Goiânia: SBSR, 2005. 13

GROGAN, J.; VIDAL, E.; SCHULZE, M. Apoio científico para os padrões de manejo de madeira na floresta amazônica: a questão da sustentabilidade. **Ciência e Ambiente**, v. 32, p. 103–117, 2006. 10

HOLDSWORTH, A. R.; UHL, C. Fire in amazonian selective logged rain forest and the potential for fire reduction. **Ecological Applications**, v. 7, n. 2, p. 713–725, 1997. 6

HOLMES, T. P.; BLATE, G. M.; ZWEED, J. C.; JÚNIOR, R. P.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. Belém: [s.n.], 2002. 69 p. 9

HOMMA, A. K. O.; CONTO, A. J. C.; FERREIRA, C. A. P.; CARVALHO, R. A. C.; WALKER, R. T. Amazônia: meio ambiente e desenvolvimento agrícola. In: _____. Platina: Embrapa, 1998. cap. A dinâmica da extração madeireira no Estado do Pará. 10

HOUGHTON, R. A. Land-use change and the carbon cycle (review). **Global Change Biology**, v. 1, n. 4, p. 275–287, 1995. 6

IBGE. **Geografia do Brasil**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1989. v. 1, 268 p. 33, 34

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **CBERS: O satélite sino brasileiro de recursos terrestres**. 1997. Disponível em: <<http://www.cbears.inpe.br/>>. Acesso em: abr. de 2009. 18

JANECZEK, D. J. **Detection and measurement of Amazon tropical forest logging using remote sensing data**. Tese (Doutorado) — Dept. of Geography, Michigan State University, 1999. 13

JOHNS, S. J.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 89, n. 1, p. 59–77, dec 1996. 9, 10

_____. Expansion of industrial logging in central africa. **science**, v. 316, n. 5830, p. 1451, 2007. 9

JÚNIOR, C. M. S.; ROBERTS, D.; COCHRANE, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2-3, p. 329–343, 2005. 13, 16

JÚNIOR, C. M. S.; ROBERTS, D.; MONTEIRO, A. Multitemporal analysis of degraded forests in the southern brazilian amazon. **Earth Interactions**, v. 9, n. 19, p. 1–25, 2005. 13, 15, 31

JÚNIOR, C. S.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the amazon. **International Journal of Remote Sensing**. 1, 2, 13, 14, 15

JÚNIOR, C. S.; FIRESTONE, L.; SILVA, L. M.; ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the eastern amazon from spot 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**. 2, 13, 15

LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos florestais da Amazônia**. Belém: [s.n.], 2005. 1, 6

- LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. **Fatos florestais da Amazônia**. Belém: [s.n.], 2003. Disponível em: <<http://www.imazon.org.br>>. 5, 6
- MALDONADO, F. D.; GRAÇA, P. M. L. A.; SANTOS, J. R. Aplicação da fração-solo por rotação radiométrica para detecção do corte seletivo em domínio da floresta amazônica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal - Brasil. **Anais...** Natal: SBSR, 2009. 2, 16
- MARTINI, A.; ROSA, N.; UHL, C. An attempt to predict which amazonian tree species may be threatened by logging activities. **Environmental Conservation**, v. 21, n. 2, p. 152–162, 1994. 6
- MATRICARDI, E. A. **Multi-temporal assessment of selective logging using remotely sensed data in the Brazilian Amazon**. Tese (Doutorado) — Michigan State University, 2003. 2, 13, 14
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; COCHRANE, M. A.; QI, J.; CHOMENTOWSKI, W. Monitoring selective logging in tropical evergreen forests using landsat: Multitemporal regional analyses in mato grosso, brazil. **Earth Interactions**, v. 9, n. 24, p. 1, 2005. 14
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; COCHRANE, M. A.; PEDLOWSKI, M.; CHOMENTOWSKI, W. Multi-temporal assessment of selective logging in the brazilian amazon using landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 1, n. 24, p. 63–82, 2007. 14
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L. C. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**. 2, 16
- MMA. **Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia**. [S.l.: s.n.]. 1
- MONTEIRO, A. L. **Monitoramento de indicadores de manejo florestal na Amazônia Legal utilizando sensoriamento remoto**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 1, 14
- MONTEIRO, A. L.; JÚNIOR, C. M. S.; BARRETO, P. Detection of logging in amazonian transition forests using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 24, p. 151–159, 2003. 13
- NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; LEFEBVRE, C. N. ande P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M. Large-scale impoverishment of amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6, p. 505–508, 1999. 1, 5

PRODES. **Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia.** Fevereiro 2009. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. 17

PRODUÇÃO e rendimento total do Estado do Pará, journal = Lex, year = 1987, volume = , pages = , month = , organization = Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, section = Delegacia regional do IBGE/Pará,. 5

RADAMBRASIL. **Juruena:** geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: [s.n.], 1980. v. 20, 458 p. 33

READ, J. M.; CLARK, D. B.; VENTICINQUE, E. M.; MOREIRA, P. M. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, v. 40, n. 3, p. 592–600, 2003. 13

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis.** Berlim: Springer-Verlag, 1986. 357 p. 25

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In: NASA. GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, 1, Washington, D. C. [S.l.]: Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium, 1973. p. 309–317. 38

SANTILLI, M.; MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S.; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; NOBRE, C. Tropical deforestation and the kyoto protocol. **Climatic Change**, v. 71, p. 267–276, 2005. 12

SANTOS, J. R.; KRUG, T.; ARAÚJO, L. S.; FILHO, G. M.; ALMEIDA, C. A. Dados multitemporais tm/landsat aplicados ao estudo da dinâmica de exploração madeireira na amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu - Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBSR, 2001. 1, 2, 13, 14, 15

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: models and methods for image processing.** [S.l.]: San Diego: Academic Press, 1997. 522 p. 25

SFB; IMAZON. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira:** produção, receita e mercados. Belém, PA: [s.n.], 2010. xv, 1, 6, 7, 8

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16–20, jan 1991. 35

SILVA, E. J. V. **Dinâmica de florestas manejadas e sob exploração convencional na Amazônia oriental.** Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. xv, 9, 16

SILVA, P. G. **Detecção de mudanças em áreas de florestas tropicais sob exploração madeireira através da técnica análise do vetor de mudanças**. 120 p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.30.14.00>>. Acesso em: jun. 2010. 13

SILVA, P. G.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; SOUZA, P. E. U.; GRAÇA, P. M. L. A. Change vector analysis technique to monitor selective logging activities in amazon tropical rainforest. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, s.n., 2003, Toulouse. [S.l.]: Proceedings, 2003. 1

STONE, T. A.; LEFEBVRE, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in para, brazil. **International Journal of Remote Sensing**. 1, 5, 12, 13, 15

UHL, C.; BARRETO, P.; VERÍSSIMO, A.; VIDAL, E.; AMARAL, P.; BARROS, A. C.; JÚNIOR, C. S.; JOHNS, J.; GERWING, J. Natural resource management in the brazilian amazon an integrated research approach. **BioScience**, v. 47, n. 3, p. 160–168, apr 1997. 5, 6, 9

UHL, C.; BARRETO, P.; VERÍSSIMO, A.; BARROS, A. C.; AMARAL, P.; VIDAL, E.; JR., C. S. **Uma abordagem integrada de pesquisa sobre o manejo dos recursos naturais na Amazônia**: a expansão madeireira na Amazônia: Impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará. Belém: IMAZON, 2002. 1

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern amazon. **Ecology**, v. 71, n. 2, p. 437–449, apr 1990. 6, 10

UHL, C.; VIEIRA, I. C. G. Ecological impacts of selective logging in the brazilian amazon: a case study from the paragominas region of the state of para. **Biotropica**, v. 21, n. 1, p. 98–106, 1989. 5, 10

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old amazon frontier: the case of paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, p. 169–199, 1992. 10

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; TARIFA, R.; UHL, C. Extraction of a high-value natural resource from amazon: The case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, v. 72, p. 39–60, 1995. 9

VERÍSSIMO, A.; JÚNIOR, C. S.; CELENTANO, D.; SALOMÃO, R.; PEREIRA, D.; BALIEIRO, C. **Áreas para produção florestal manejada**: detalhamento do macrozoneamento ecológico econômico do estado do Pará. Pará: [s.n.], 2006. 1

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI., M. **Pólos madeireiros do Estado do Pará.** Belém: [s.n.], 2002. 75 p. [10](#), [11](#)

VIDAL, E.; GERWING, J.; BARRETO, P.; AMARAL, P.; JOHNS, J. **Redução de desperdícios na Produção de Madeira na Amazônia.** Ananindeua: [s.n.], 1997. 18 p. [9](#)

WATRIN, O. S.; ROCHA, A. M. A. **Levantamento da vegetação natural do uso da terra no município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/Landsat.** 1992. 20 p. Boletim de Pesquisa n. 124. [1](#), [13](#), [15](#)

