



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.25.12.16-TDI

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO
MAPEAMENTO DE PALEOMORFOLOGIAS NO
INTERFLÚVIO MADEIRA-PURUS, SUDOESTE DA
AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Thiago de Castilho Bertani

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pela Dra. Dilce de Fátima Rossetti, aprovada em 12 de maio de 2011.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39J8MUH>](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39J8MUH)

INPE
São José dos Campos
2011

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



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.25.12.16-TDI

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO
MAPEAMENTO DE PALEOMORFOLOGIAS NO
INTERFLÚVIO MADEIRA-PURUS, SUDOESTE DA
AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Thiago de Castilho Bertani

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pela Dra. Dilce de Fátima Rossetti, aprovada em 12 de maio de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39J8MUH>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bertani, Thiago de Castilho.
B462s Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento de paleomor-
fologias no interflúvio Madeira-Purus, sudoeste da Amazônia bra-
sileira / Thiago de Castilho Bertani. – São José dos Campos :
INPE, 2011.
xxiv + 104 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.25.12.16-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
Orientadora : Dra. Dilce de Fátima Rossetti.

1. Savanas da Amazônia. 2. Mapeamento de paleomorfologias.
3. MDE-SRTM. 4. Análise orientada a objeto. I.Título.

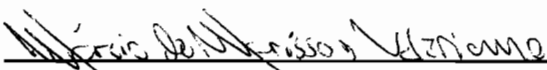
CDU 528.8:911.2 (811.1) (811.3)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, arma-
zenada 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 es-
crita 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.

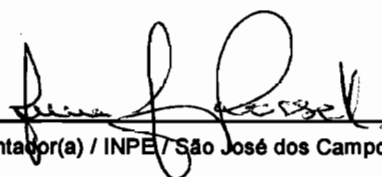
Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a
retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying,
recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception
of any material 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. Marcio de Morisson Valeriano


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

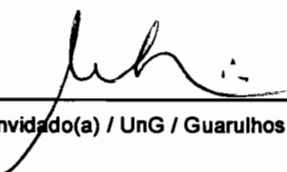
Dra. Dilce de Fátima Rossetti


Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


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

Dr. Mário Lincoln De Carlos Etchebehere


Convidado(a) / UnG / Guarulhos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

☒ unanimidade

Aluno (a): Thiago de Castilho Bertani

São José dos Campos, 12 de maio de 2011

Quem sabe tentando dizer-me a outrem
Não venha a descobrir a palavra que somos
É quase sempre maçante
Mas quem sabe de tantos rabiscos
Faça-se um auto-retrato falado
Para os cartazes de procura-se
Pelo crime de inventar-se, escrevendo
A caricatura muitas vezes mais fiel
Que a fotografia, onde maquiagem e cenário
Tapeiam o observador desatento

Karai Mirim

Nanos gigantum humeris insidentes

(metáfora em latim registrada no século XII que significa "Aquele que adquire habilidades intelectuais futuras pelo entendimento da pesquisa e do trabalho de pensadores notáveis do passado")

Dedico este trabalho a meus queridos pais, Edson e Eliane.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Dilce de Fátima Rossetti, por sua paciência, apoio e opiniões ao longo dos últimos dois anos.

Aos pesquisadores do INPE, especialmente a Márcio de Morisson Valeriano e Paulo César Gurgel de Albuquerque, por todo o tempo a mim dedicado, e por apresentarem sempre sugestões valiosas que auxiliaram o término de minha dissertação.

A todos os colegas de pós-graduação, principalmente o pessoal da minha sala, por sua amizade e por tornarem nosso convívio sempre agradável, mesmo nas horas difíceis.

Ao Ericson Hideki Hayakawa, Hiran Zani e Tércio Novack por sua estima e pela pronta assistência e contribuições de grande utilidade no meu trabalho.

Ao pessoal da CPRM de Porto Velho, aos oficiais do 54º Batalhão de Infantaria da Selva de Humaitá e ao professor Marcelo Cancela Lisboa Cohen pela grande colaboração nos trabalhos de campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Agradeço também a meus irmãos, Thalia, Débora e Hugo, e a minha namorada, Walkiria, que sempre me apoiaram e me incentivaram, mesmo antes do trabalho se iniciar.

RESUMO

A história geológica de sistemas fluviais amazônicos durante o final do Quaternário pode ser reconstituída, em parte, por meio da análise de paleomorfologias fluviais preservadas na paisagem atual. O mapeamento destas feições em áreas amplas na Amazônia favorece sua caracterização. Estudos recentes demonstraram existir relação direta entre paleomorfologias e contrastes vegetacionais em áreas amazônicas. O desenvolvimento de metodologias que promovam a classificação de padrões vegetacionais em dados de sensoriamento remoto é de grande interesse para estudos regionais que demandem o mapeamento de paleomorfologias. O objetivo deste trabalho foi o de utilizar produtos e técnicas de sensoriamento remoto para detecção e classificação de contrastes vegetacionais e topográficos de interesse ao mapeamento de paleomorfologias fluviais no interflúvio Madeira-Purus, sudoeste da Amazônia. A metodologia aplicada baseou-se na integração de imagens Landsat-7/ETM+ e MDE-SRTM por meio de Análise Orientada a Objeto (AOO), bem como no levantamento topográfico de detalhe em campo a fim de controlar o efeito da altura de dosséis vegetais nos dados topográficos digitais. A integração de dados de sensoriamento remoto resultou em aumento significativo do número e da precisão de segmentos de vegetação classificados, incluindo-se contrastes sutis localizados em áreas florestais. A análise dos segmentos classificados revelou que estes se distribuem em cinturões alongados e ligeiramente sinuosos, de dimensões regulares, articulados espacialmente de forma a configurar malhas de padrão dendrítico. Adicionalmente, estes segmentos orientam-se, de modo geral, paralelamente às direções dos rios principais no interflúvio Purus-Madeira. Estas características levaram a concluir que padrões vegetacionais encontrados nos segmentos, correspondentes às classes Savana e Floresta baixa, ocorrem sobre paleomorfologias fluviais, principalmente paleocanais. Com base neste estudo, sugere-se que os principais sistemas tributários do interflúvio Purus-Madeira sofreram forte inversão de fluxo de sul/sudeste para norte/noroeste durante o final do Quaternário em função de reativações tectônicas. As paleomorfologias fluviais aqui descritas registram períodos em que os canais ainda fluíam para o rio Madeira. O confinamento de áreas de savana a segmentos de paleocanais constitui-se em forte argumento de que a origem deste tipo vegetacional na área de estudo foi determinada por processos sedimentares relacionados com a dinâmica fluvial. Esta interpretação é contrária a hipóteses anteriores, que relacionam a origem dessas áreas de savana à influência de flutuações climáticas.

REMOTE SENSING APPLIED TO PALEOMORPHOLOGIC MAPPING IN THE MADEIRA-PURUS INTERFLUVE, BRAZILIAN AMAZONIA

The geological history of Amazonian fluvial systems throughout the latest Quaternary can be reconstructed, partially, through the analysis of fluvial paleomorphologies that are still preserved in the landscape. Mapping these features in large Amazonian areas can help their characterization. Recent studies have demonstrated a direct relationship between paleomorphologies and vegetation contrasts for Amazonian areas. The development of methodologies that aid the classification of vegetation patterns in remote sensing data is of great interest for regional studies demanding paleomorphologic mapping. The aim of this work was to use remote sensing data and techniques in order to enhance the detection and classification of vegetation and topographic contrasts as a surrogate for paleomorphologic mapping in the Madeira-Purus interfluve, southwest Amazonia. The applied methodology was based in the integration of Landsat-7/ETM+ images and SRTM-DEM using Object-Based Image Analysis (OBIA) techniques, as well as in field topographic survey in order to control the effect of vegetation canopy height in the SRTM-DEM products. The integration of remote sensing data resulted in a significant increase in the number and precision of classified vegetation segments, including subtle vegetation contrasts in forested areas. Analysis of the classified segments showed that they are spatially distributed as elongated strings, with slightly sinuous geometry, of regular dimensions, which configure a dendritic network. Additionally, these segments have a main trend parallel to the direction of the main river systems in the study area. These characteristics lead to the conclusion that vegetation patterns corresponding to Savana and Low forest classes occur over fluvial paleomorphologies, especially paleochannels. Based on this study, it is suggested that the main tributary systems of the Madeira-Purus interfluve experienced flow inversion, from south/southeast to north/northwest, during the latest Quaternary due to tectonic reactivations. The fluvial paleomorphologies described herein document earlier times when these channels were still flowing toward the Madeira River. The confinement of areas of savanna vegetation to paleochannel segments constitutes a strong argument that the occurrence of this vegetation type in the study area was determined by sedimentary processes related to fluvial dynamics rather than to influence of climatic fluctuations as suggested earlier in the literature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Localização da área de estudo.	7
Figura 4.2 - Contexto geológico e limites da Bacia do Solimões.....	8
Figura 4.3 - Representação do relevo a partir de MDE em paleta colorida.	10
Figura 4.4 - Unidades morfoestruturais representadas em transecto.....	11
Figura 4.5 - Tipos vegetacionais na área de estudo	14
Figura 5.1 - Representação esquemática de um sistema fluvial ideal.	16
Figura 5.2 - Tipos principais de canais aluviais.	17
Figura 5.3 - Principais elementos topográficos e subambientes de sedimentação em planícies de inundação.....	18
Figura 6.1 - Localização das cenas Landsat-7/ETM+ em relação a área de estudo.....	34
Figura 7.1 - Fluxograma ilustrando as principais atividades metodológicas	37
Figura 7.2 - Fluxograma ilustrando a transformação do MDE.....	40
Figura 7.3 - (a) Formato da janela aplicada ao MDE. (b) Esquema ilustrativo do efeito na superfície do MDE após a transformação dos valores de elevação.....	40
Figura 7.4 - Ilustração do processo de extração de objetos classificados do nível A para o nível B no aplicativo DEFINIENS.	44
Figura 7.5 - Localização das bases de coordenadas utilizadas para levantamento topográfico na área de estudo.	46
Figura 8.1 - Mosaico de imagens Landsat7-ETM+ da área de estudo	50
Figura 8.2 - Imagem resultante da análise de componentes principais (CP1).....	51

Figura 8.3 - Imagem em níveis de cinza obtida a partir do MDE.	53
Figura 8.4 - Comparação entre composição colorida Landsat-7/ETM+ e MDE	54
Figura 8.5 - Transectos com contrastes altitudinais derivados de dados MDE.....	55
Figura 8.6 - MDE realçado por esquema de cores	56
Figura 8.7 - MDE' após aplicação de esquema de cores.....	57
Figura 8.8 - Comparação dos produtos MDE e MDE'.....	58
Figura 8.9 - Exemplos de resultados da segmentação A.	59
Figura 8.10 - Resultados da classificação 'Corpos D'água' e 'Cursos Fluviais'.	59
Figura 8.11 - Exemplos de limites entre objetos da classe 'Objetos Claros'.	60
Figura 8.12 - Árvore de decisão gerada pelo aplicativo WEKA.....	62
Figura 8.13 - Resultado final da separação de segmentos da classe 'Objetos Claros' ...	63
Figura 8.14 - Exemplo do resultado da segmentação B, aplicada ao MDE'	64
Figura 8.15 - Resultado da classificação da classe 'Floresta Baixa'.	65
Figura 8.16 – Exemplo da classificação final (a) e edição manual de polígonos (b).. ...	66
Figura 8.17 - Distribuição espacial dos três grupos de segmentos de vegetação.	68
Figura 8.18 - Segmentos com maior valor de área utilizados na análise geométrica.....	69
Figura 8.19 - Rede de drenagem da área de estudo e segmentos de vegetação.....	71
Figura 8.20 - Localização dos perfis altimétricos obtidos na área de estudo	73
Figura 8.21 - Localização do perfil altimétrico A-B.	74
Figura 8.22 - Localização do perfil altimétrico C-D.	75

Figura 8.23 - Localização do perfil altimétrico E-F.	76
Figura 8.24 - Localização do perfil altimétrico G-H.	77
Figura 9.1 - Esquema ilustrando morfologia positiva do relevo em áreas cobertas por vegetação de savana em relação a áreas de floresta adjacentes.....	81
Figura 9.2 - Rias fluviais localizadas a norte da área de estudo.....	84
Figura 9.3 - Diagrama ilustrando esquematicamente o processo de avanço de áreas de vegetação florestal sobre áreas de savana e de floresta baixa.	86
Figura 9.4 - Modelo geral dos padrões vegetacionais que ocorrem sobre sítios deposicionais abandonados.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Landsat-7/ETM+ utilizadas nesta pesquisa.	33
Tabela 6.2 - Bandas espectrais das imagens Landsat-7/ETM+ utilizadas.....	34
Tabela 6.3 - Cartas topográficas utilizadas como base de dados nesta pesquisa.....	35
Tabela 7.1 - Classes utilizadas para agrupar objetos e suas definições.....	42
Tabela 7.2 - Especificações dos métodos utilizados para o levantamento topográfico.	45
Tabela 8.1 - Resultados da avaliação da classificação de amostras.	61
Tabela 8.2 - Número de segmentos e área ocupada pelas classes na área de estudo.	66
Tabela 8.3 - Área total e média para grupos de segmentos de interesse.	68
Tabela 8.4 - Valores de atributos expressando propriedades geométricas dos segmentos.	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. HIPÓTESE.....	5
4. ÁREA DE ESTUDO	7
4.1 Localização e acesso.....	7
4.2 Contexto Geológico.....	8
4.3 Aspectos Geomorfológicos.....	10
4.4 Clima e Vegetação.....	12
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
5.1 Sistemas Fluviais	15
5.1.1 Definições.....	15
5.1.2 Paleomorfologias	20
5.2 Sensoriamento Remoto.....	20
5.2.1 Detecção de paleomorfologias	20
5.2.2 Mapeamento de vegetação	22
5.2.3 Dados orbitais	25
5.2.3.1 MDE-SRTM	25
5.2.3.2 Imagens Landsat.....	26
5.2.4 Classificação de imagens.....	26
5.2.5 Técnicas de segmentação de imagens	29
6. MATERIAIS	33
6.1. Dados topográficos digitais	33
6.2. Imagens ópticas	33

6.3. Dados cartográficos	34
7. MÉTODOS.....	37
7.1. Extração da rede de drenagem atual	38
7.2. Extração de segmentos de vegetação com base em sensoriamento remoto.....	38
7.2.1 Pré-processamento e transformações	38
7.2.2 Classificação das imagens de sensoriamento remoto	41
7.3 Levantamento topográfico em campo	45
7.4 Caracterização de segmentos de vegetação	47
8. RESULTADOS	49
8.1 Processamento dos dados de sensoriamento remoto	49
8.2 Extração de segmentos de vegetação.....	58
8.3 Caracterização dos segmentos de vegetação	68
8.3.1 Segmentos de vegetação e rede de drenagem atual.....	71
8.3.2 Segmentos de vegetação e topografia.....	72
9. DISCUSSÃO	78
9.1 Avaliação da extração semi-automática de segmentos de vegetação.....	78
9.2 Significado dos dados extraídos do MDE-SRTM	79
9.3 Interpretação de segmentos de vegetação.....	82
9.4 Distribuição de vegetação.....	85
10. CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1. INTRODUÇÃO

Um volume crescente de estudos tem sugerido que instabilidades tectônicas promoveram uma história complexa de migração e abandono de rios na Amazônia durante o Quaternário (p.e. ROSSETTI et al., 2007, 2008; ROSSETTI; VALERIANO, 2007; HAYAKAWA et al., 2010a). De acordo com esses autores, essa história passada pode ser reconstituída, pelo menos em parte, por meio da análise de inúmeras paleomorfologias fluviais que ficaram preservadas na paisagem. A análise destas feições fornece informações valiosas para discutir fatores (i.e. clima, tectônica, variação do nível do mar) que influenciaram o desenvolvimento dos sistemas fluviais atuais.

Estudo recente demonstrou estreita relação entre paleomorfologias e contrastes entre padrões vegetacionais em áreas amazônicas (p.e. ROSSETTI et al., 2010). De acordo com esses autores, contrastes bruscos entre vegetação aberta e florestal, bem como diferenciações sutis na cobertura florestal, podem ser explicados analisando-se a história evolutiva dos sistemas deposicionais destas áreas no final do Quaternário. A gênese de manchas de vegetação aberta, principalmente de áreas de savana, em terras baixas amazônicas é tema de discussões na literatura (ver HAFFER; PRANCE, 2001). Grande parte das hipóteses aventadas para explicar sua origem considera a influência de flutuações climáticas durante eventos glaciais e interglaciais quaternários, onde vegetação de savana é atribuída a períodos passados presumivelmente mais secos relativamente aos atuais.

Reconstituições paleoambientais em áreas amazônicas podem ser mais complexas que em outras regiões do globo. Isto se deve à grande dimensão dessa região, ao difícil acesso em função da densa cobertura vegetal, e à carência de exposições naturais para coleta de dados geológicos (ROSSETTI; GOES, 2008). Estas reconstituições podem ser auxiliadas pela análise de paleomorfologias fluviais, sendo que seu mapeamento favorece sua melhor caracterização. Pelo fato de paleomorfologias fluviais encontrarem-se, muitas vezes, obliteradas pela densa cobertura florestal em áreas amazônicas, é importante o mapeamento de contrastes vegetacionais que possa ser aplicado ao reconhecimento de paleomorfologias.

Trabalhos recentes têm sugerido que a detecção de paleomorfologias fluviais em regiões amazônicas pode ser favorecida pela utilização de dados de sensoriamento remoto (p.e. MANTELLI et al., 2009; ROSSETTI, 2010). Este tipo de abordagem permite detectar padrões vegetacionais sutis associados à presença de paleomorfologias, as quais são de difícil identificação por outros meios, mesmo a partir de levantamentos de campo (ROSSETTI et al., 2007). Adicionalmente, a utilização de dados de sensoriamento remoto representa uma alternativa rápida, de baixo custo, e que permite o mapeamento de paleomorfologias fluviais em grandes áreas.

Áreas com fortes contrastes vegetacionais são de fácil identificação em imagens ópticas, relativamente a áreas com densa cobertura florestal. Por outro lado, a aplicação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), complementarmente às imagens ópticas, tem sido de grande utilidade para detecção de paleomorfologias fluviais em áreas amazônicas, mesmo sob densa cobertura florestal (ALMEIDA-FILHO; MIRANDA, 2007; HAYAKAWA et al., 2010a,b). Isto se deve à interação do comprimento de onda relativamente curto da banda C (5.6 cm) com elementos de dosséis florestais, resultando em contrastes altitudinais visíveis em MDE. Estes contrastes, por sua vez, estão relacionados a diferenciações topográficas e variações nos padrões vegetacionais, os quais podem estar associados à presença de paleomorfologias fluviais.

Trabalhos que envolvem mapeamento de paleomorfologias em áreas amazônicas têm procedido com a extração manual por análise visual de produtos de sensoriamento remoto. Isto implica em alto consumo de tempo, principalmente no caso de grandes áreas. Consequentemente, é importante explorar técnicas de sensoriamento remoto que permitam acelerar o processo de mapeamento de paleomorfologias fluviais, principalmente em estudos de caráter regional, por meio de classificação ou extração semi-automática.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi o de utilizar produtos e técnicas de sensoriamento remoto para classificação de contrastes entre vegetação e topográficos em trecho do interflúvio Madeira-Purus, no limite entre os estados do Amazonas e de Rondônia.

Objetivos específicos incluíram:

- a) Investigar a distribuição de padrões de vegetação e analisar sua possível associação com paleomorfologias fluviais;
- b) Caracterizar segmentos de vegetação quanto à sua geometria, distribuição espacial e situação topográfica em produtos de sensoriamento remoto;
- c) Analisar contrastes altitudinais e vegetacionais detectados em produtos de sensoriamento remoto frente a dados topográficos coletados em campo;
- d) Identificar elementos do sistema fluvial moderno que sejam aplicáveis à detecção de segmentos de vegetação de interesse, tanto em áreas com contrastes vegetacionais bem definidos, quanto em áreas florestais;
- e) Estabelecer modelo que explique contrastes vegetacionais na área de estudo.

3. HIPÓTESE

Contrastes altitudinais e vegetacionais observados em dados de sensoriamento remoto correspondem a paleomorfologias representativas de ambientes fluviais pretéritos na área de estudo.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e acesso

A área de estudo, com aproximadamente 40.000 km², localiza-se ao longo do interflúvio dos rios Madeira e Purus (Figura 4.1). Esta área, compreendida entre 7° e 9° de latitude sul e 65° a 62° 50' de longitude oeste, foi selecionada por: conter amplas manchas de savana em contrastes bruscos com áreas de floresta densa; ser de fácil acesso para investigação em campo; e ter sido interpretada como contendo vegetação residual formada em períodos áridos passados.

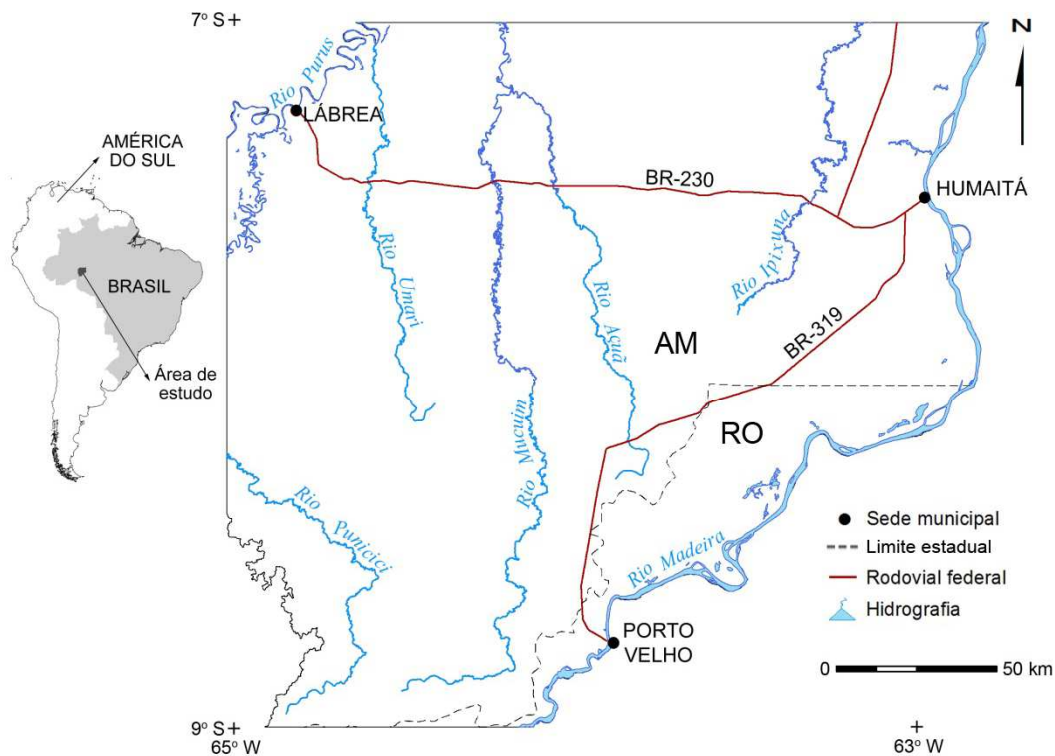


Figura 4.1 - Localização da área de estudo.

Politicamente, a área de estudo compreende a parte do sul do Estado do Amazonas e a parte norte do Estado de Rondônia. Os principais municípios de acesso ao local são

Humaitá (AM), Lábrea (AM) e Porto Velho (RO). A partir desses municípios, trechos estratégicos sugestivos de paleomorfologias e cobertos por vegetação aberta podem ser acessados utilizando-se a rodovia Porto Velho-Manaus (BR-319), ao sul, e a rodovia Transamazônica (BR-230), ao norte. Outros trechos podem ser acessados por via fluvial, sobretudo utilizando-se os principais afluentes do rio Purus que cruzam a área de estudo, como os rios Ipixuna, Mucuí, Umari e Açuã.

4.2 Contexto Geológico

A área de estudo está inserida na porção sudeste da Bacia do Solimões. Esta bacia separa-se da Bacia do Amazonas, a oeste, pelo Arco de Purus, tendo ainda como limites norte e sul os Escudos das Guianas e do Brasil Central, respectivamente (Figura 4.2). Para oeste, em posição central, ocorre o Arco de Carauari, que subdivide a Bacia do Solimões em dois compartimentos. O compartimento oeste limita-se com a Bacia do Acre por meio do Arco de Iquitos. Para o leste, ocorre o Megacisalhamento do Solimões, que subdivide a Bacia do Solimões em dois compartimentos. O compartimento leste limita-se com a Bacia do Amazonas por meio do Arco de Gurupá. A área de estudo está localizada na porção sudeste da Bacia do Solimões, entre o Arco de Purus e o Megacisalhamento do Solimões.

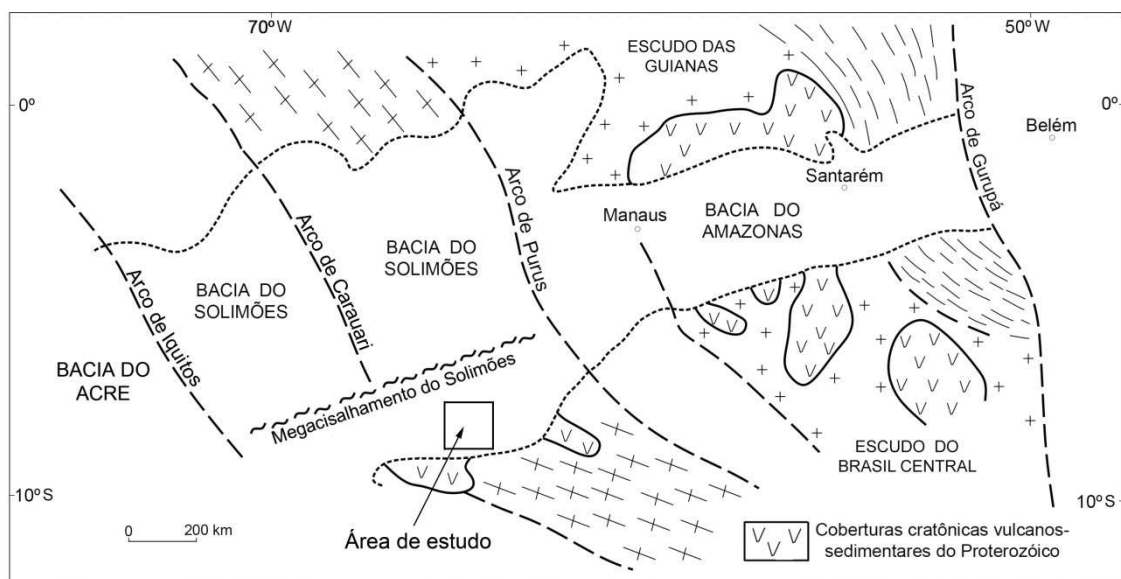


Figura 4.2 - Contexto geológico e limites da porção sudeste da Bacia do Solimões.

Fonte: Adaptado de Caputo e Silva (1990).

A formação da estrutura tectônica da Bacia do Solimões foi complexa, tendo sido resultante de falhamentos associados com estiramento crustal intraplaca durante o Paleozóico. Durante o início da abertura do Atlântico Sul, no final do Jurássico, a região noroeste da América do Sul esteve submetida a esforços compressivos de grande magnitude, o que deu origem à Cadeia Andina (JORDAN, KLEIN, 1995). Este processo teve reflexos importantes na Bacia do Solimões, onde houve o desenvolvimento de uma zona de falhas e dobras, designada de Megacisalhamento do Solimões (Figura 4.2), bem como várias outras estruturas subsidiárias (APOLUCENO NETO; TSUBONE, 1988). Quatro eventos principais de estiramento são registrados durante o Ordoviciano-Devoniano Inferior, Devoniano-Carbonífero Inferior, Carbonífero Médio a Permiano e Cretáceo ao Cenozóico (GONZAGA et al., 2000).

A calha central da Bacia do Solimões contém sucessões sedimentares que perfazem um total de 3800 m de espessura. As rochas paleozóicas formam três megassequências sedimentares, representativas dos intervalos Ordoviciano-Devoniano, Devoniano-Carbonífero e Permo-Carbonífero (EIRAS et al., 1994; MILANI; ZAIAN, 1998). Além dos depósitos paleozóicos, a Bacia do Solimões apresenta cobertura mesozóica-cenozóica englobada sob a designação de Grupo Javari (CUNHA et al., 1994; EIRAS et al., 1994). Esses estratos, representados pelas formações Alter do Chão e Solimões, são de idade cretácea e miocena, respectivamente. A Formação Alter do Chão tem ocorrência restrita no leste dessa bacia, estendo-se, de forma ampla, em direção à Bacia do Amazonas. Esta unidade consiste em arenitos grossos, argilitos, conglomerados e brechas intraformacionais de coloração vermelho-amarronzados, tradicionalmente atribuídos a sistemas fluviais. A Formação Solimões é de ocorrência restrita nas proximidades do Arco de Purus, espessando-se a oeste por toda a extensão da Bacia do Solimões, e continuando em direção à Bacia do Acre e outras bacias andinas. Esta unidade é composta de litologias relativamente mais finas que a Formação Alter do Chão, incluindo argilito vermelho e cinza com fósseis abundantes e camadas de linhito e, em menor quantidade, arenito grosso, que foram formados em ambientes lacustres, fluviais e deltaicos (ROSSETTI et al., 2005).

Além das formações Alter do Chão e Solimões, a cobertura sedimentar da Bacia do Solimões inclui estratos pliocenos e quaternários, genericamente incluídos na Formação

Içá (CAPUTO et al., 1972; CUNHA et al., 1994; MAIA et al., 1977), além de uma série de terraços fluviais pleistocenos tardios e holocenos (ROSSETTI et al., 2005).

4.3 Aspectos Geomorfológicos

A área de estudo compreende uma faixa de baixos terraços que separa terrenos cristalinos, ao sul, e largas calhas aluviais do rio Amazonas, ao norte. Suas altitudes estão distribuídas entre as cotas de 9 e 213 m. As áreas mais altas concentram-se ao sul e as áreas mais baixas ocorrem nas proximidades das calhas dos rios principais, Madeira e Purus. Em sua porção central, a área de estudo mostra distribuição de altitudes relativamente homogênea e relevo pouco dissecado (Figura 4.3).

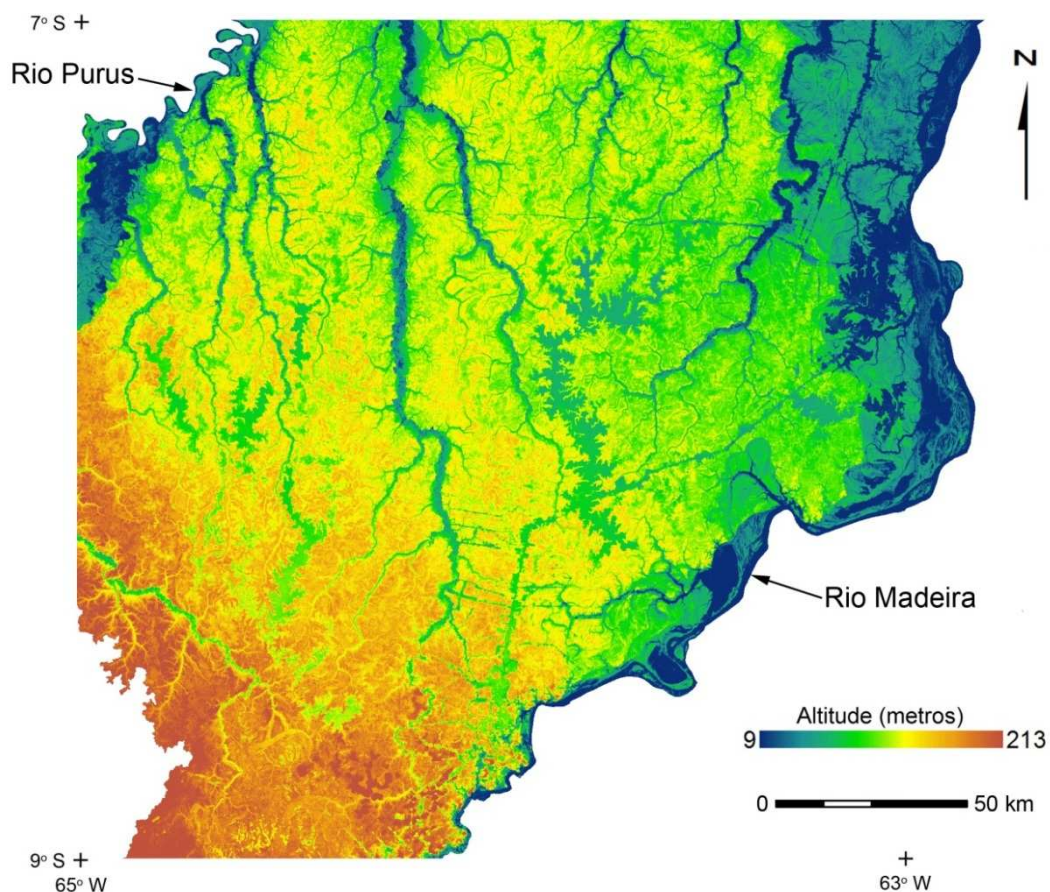


Figura 4.3 - Representação do relevo a partir de MDE em paleta colorida.

Estudos geomorfológicos realizados pelo RADAMBRASIL (1978) levaram à identificação de duas unidades morfoestruturais na área de estudo. Estas foram denominadas Planícies Fluviais da Amazônia e Planalto Rebaixado da Amazônia (Occidental) (Figura 4.4).

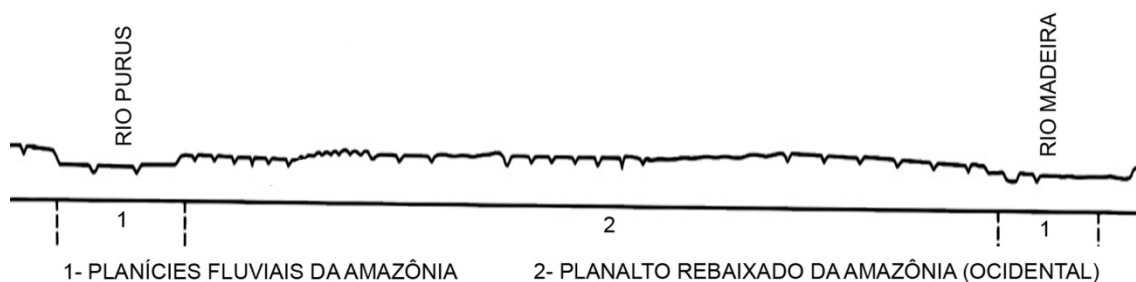


Figura 4.4 - Unidades morfoestruturais representadas em transecto localizado a aproximadamente 100 km ao norte do limite superior da área estudo.

Fonte: Adaptado de RADAMBRASIL (1978).

A primeira unidade compreende as planícies aluviais dos rios Madeira e Purus. Amplos terraços acompanham as calhas desses rios que, por vezes, podem englobar suas planícies fluviais atuais. Os terraços fluviais apresentam descontinuidade espacial frequente, assim como imprecisão de limites em relação às planícies fluviais. Os rios Madeira e Purus apresentam orientação geral NE-SW e desaguam nos rios Amazonas e Solimões, respectivamente. No caso do rio Madeira, entretanto, a planície fluvial é bastante estreita em sua margem esquerda. Nesta margem também foram registrados poucos afluentes, que tem extensão significativamente menor em relação aos afluentes da margem direita (SOUZA FILHO et al., 1999).

Lagos, furos, igarapés, paranás, meandros abandonados e depósitos aluviais fazem parte das planícies aluviais dos rios Madeira e Purus (RADAMBRASIL, 1978). Segundo esses autores, as planícies aluviais contêm aluviões quaternários recentes e antigos solos Hidromórficos Gleyzados e Aluviais, e terraços aluviais com solos Podzólicos Vermelho-Amarelos Álicos.

A unidade morfoestrutural Planalto Rebaixado da Amazônia (Ocidental) é composta por extensas áreas de interflúvios tabulares dissecados, com superfícies pediplanadas e colinas (RADAMBRASIL, 1978). A superfície pediplanada encontra-se na faixa norte a partir do rio Purus e no interflúvio Purus/Madeira. A litologia do Planalto é representada pela ampla distribuição de sedimentações quaternárias, compostas principalmente por sedimentos da Formação Solimões (LATRUBESSE et al., 2010). Os solos que ocorrem nesta unidade são os Podzólicos Vermelho-Amarelos, as Lateritas Hidromórficas de elevações e os Latossolos Amarelos. Os padrões de drenagem dominantes são do tipo dendrítico na porção noroeste e norte, e retangular no restante.

4.4 Clima e Vegetação

O clima é o equatorial quente e úmido, com temperaturas médias anuais variando entre 24°C e 26°C, e precipitações limitadas pelas isoietas de 2.250 mm e 2.750 mm. O período chuvoso comumente inicia-se em outubro, com maiores índices de pluviosidade entre janeiro e março (RADAMBRASIL, 1978).

Em relação à vegetação, a área de estudo é bastante diversificada (BRAUN; RAMOS, 1959), sendo caracterizada por manchas de vegetação aberta em contato brusco com vegetação florestal, além de espécies de palmeiras frequentes (RADAMBRASIL, 1978). Os mesmos autores diferenciaram os seguintes tipos de regiões fitoecológicas para esta área: Floresta Tropical Densa, Floresta Tropical Aberta, Formações Pioneiras e Savanas. As últimas ocorrem como enclaves em meio a formações florestais.

A Floresta Tropical Densa possui composição florística heterogênea, destacando-se pela ocorrência de espécies emergentes (i.e., maiores que 30 m). Diferenciações específicas quanto à ocorrência de algumas espécies foram atribuídas a variações pedológicas e do relevo (BISPO, 2007). Esta região encontra-se, preferencialmente, em locais relativamente úmidos, estando frequentemente associada a fundos de vales aluviais.

A Floresta Tropical Aberta é o tipo dominante na área de estudo. Foi descrita como uma região fitoecológica onde se encontram espécies arbóreas mais espaçadas e de altura irregular variando entre 15 e 25 m. Nas áreas cobertas por este tipo de vegetação, a ocorrência de palmeiras é mais frequente relativamente às áreas contendo Floresta

Tropical Densa, principalmente onde há maior susceptibilidade às variações sazonais de umidade.

Formações Pioneiras foram descritas como região fitoecológica de caráter sucessional ou transicional, onde predominam espécies herbáceas e arbóreas. Estas áreas localizam-se, preferencialmente, ao longo de rios e em meio a áreas de Floresta Tropical Densa. Em áreas cobertas por Formações Pioneiras, existem dois tipos de contatos, denominados de influência aluvial e pluvial. O contato das áreas de influência aluvial ocupa os terraços e planícies aluviais, na maioria das vezes cobrindo meandros abandonados e outros terrenos deprimidos. O contato das áreas de influência pluvial está localizado em porções predominantemente interfluviais.

Savanas consistem em vegetação predominantemente aberta, com composição de espécies de gramíneas, seguidas por espécies herbáceas e arbóreas. Estas áreas podem possuir cobertura arbórea leve a densa. Em função do porte, Savanas são subdivididas em: I-Gramíneo-Lenhosa; II-Parque; III-Arbórea Aberta; e IV-Arbórea Densa. As fisionomias de Savana predominantes na área de estudo são dos tipos I e II, que correspondem a vegetação de áreas conhecidas como "Campos de Puciari-Humaitá". Fisionomias arbóreas (III e IV) prevalecem em áreas de contato Savana/Floresta.

Em função da diferente escala de observação e dos propósitos deste trabalho, utilizou-se nomenclatura simplificada para as referidas regiões fitoecológicas da área de estudo da seguinte forma: Floresta Tropical Densa e Floresta Tropical Aberta = floresta densa; Savana dos tipos I e II = savana; Savana dos tipos III e IV = floresta baixa; e Formações Pioneiras de influência aluvial = formações pioneiras (Figura 4.5).

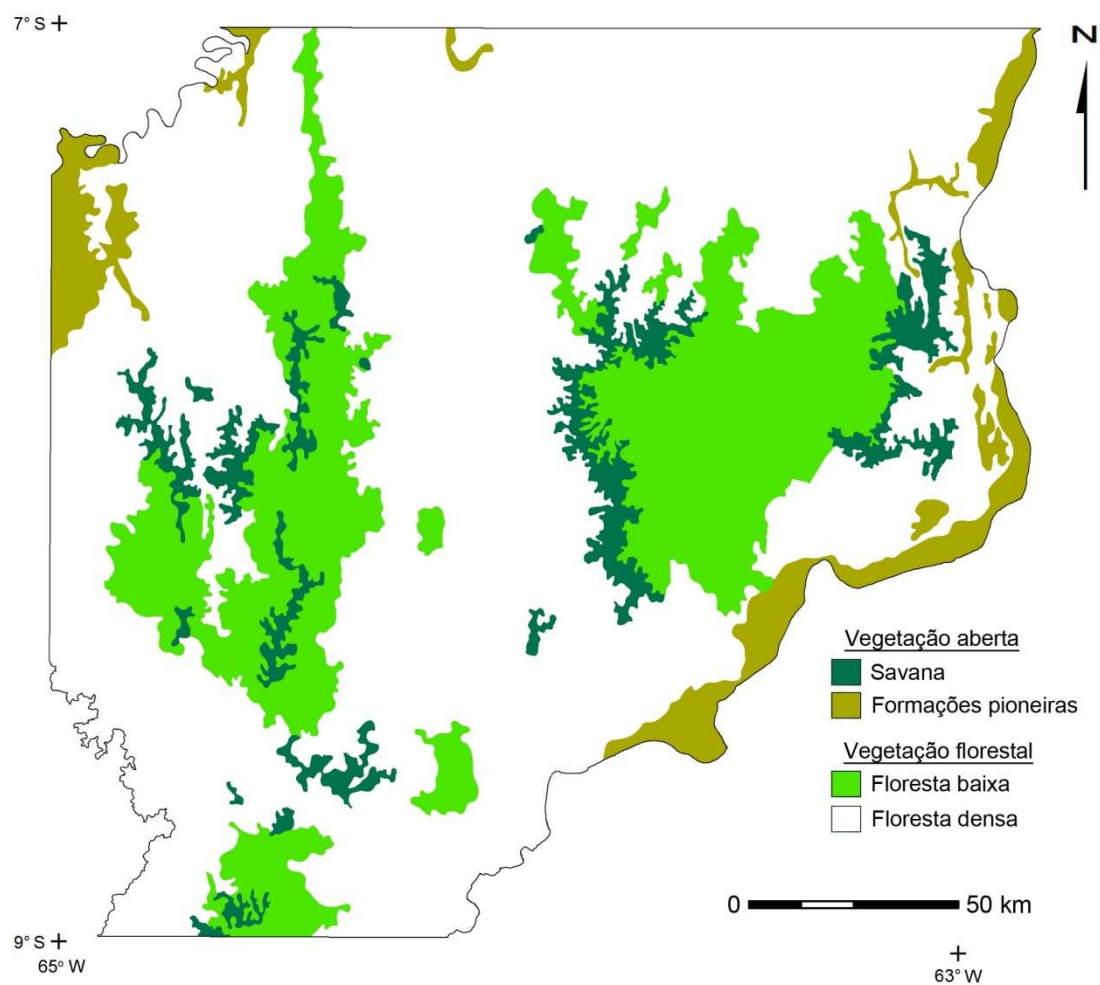


Figura 4.5 - Tipos vegetacionais na área de estudo (ver descrição das classes de acordo com as regiões fitoecológicas descritas no texto).

Fonte: Adaptado de RADAMBRASIL (1978).

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo de paleomorfologias fluviais envolve conhecimento prévio sobre sistemas fluviais, sendo que os conceitos gerais destes são apresentados no item subsequente, neste capítulo. Dado que o mapeamento de paleomorfologias fluviais pode ser realizada por meio de produtos de sensoriamento, o segundo item deste capítulo engloba revisão dos produtos adequados à detecção destas, bem como dos métodos adequados ao mapeamento de vegetação. A partir destes, descreveu-se, com maior detalhe, características dos dados de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho (i.e. imagens Landsat e MDE-SRTM). Por fim, foi realizada breve revisão das principais técnicas disponíveis atualmente para processar estes dados (i.e. classificação e segmentação de imagens de sensoriamento remoto).

5.1 Sistemas Fluviais

5.1.1 Definições

Bacias de drenagem são definidas como unidades geomórficas correspondentes à área drenada por um rio ou sistema fluvial. Os canais fluviais localizados dentro de uma bacia de drenagem estão conectados e organizam-se em redes complexas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Um sistema fluvial ideal pode ser dividido em três zonas distintas (Figura 5.1) em função da vazão hídrica e do fluxo de sedimentos (SCHUMM, 1977): zona 1, localizada nos setores mais altos, a montante, e considerada área de produção de sedimentos e origem dos fluxos hídricos; zona 2, denominada de zona de transferência de sedimentos, onde, para canais estabilizados, as cargas sedimentares de entrada e saída são iguais; e zona 3, chamada de área de deposição, onde ocorre o acúmulo preferencial de sedimentos oriundos das zonas 1 e 2.

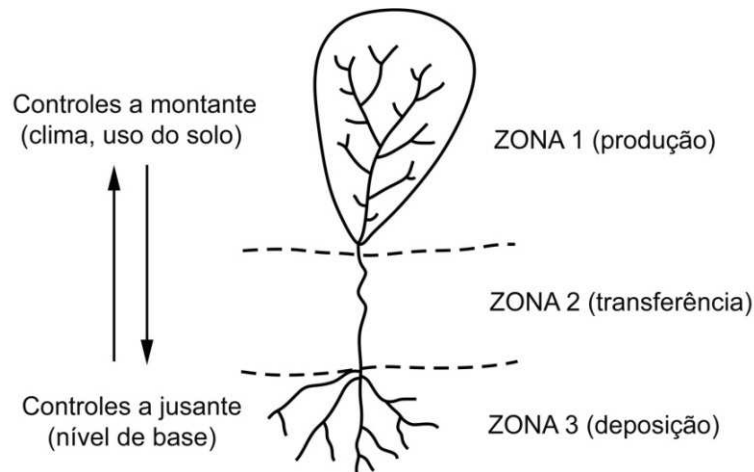


Figura 5.1 - Representação esquemática de um sistema fluvial ideal.

Fonte: Adaptado de Schumm (1977).

Dentre as componentes principais dos sistemas fluviais destacam-se canais e planícies de inundação. Canais consistem em depressões formadas pela ação do fluxo no substrato sob condições de alta energia, quando processos erosivos são favorecidos. A largura da zona de turbulência do canal pode influenciar a natureza dos sedimentos depositados próximos a ele. Estes tendem a ser granulometricamente mais grossos do que os depósitos de planícies de inundação, onde a energia do fluxo diminui, causando deposição preferencial a partir de suspensões (MARRIOTT, 1996). Contudo, outros fatores, como a disponibilidade de sedimentos, características da fonte e magnitude de eventos episódicos, também influenciam os tipos de depósitos formados em sistemas fluviais (POSAMENTIER; WALKER, 2006).

Morfológicamente, os canais fluviais variam de retilíneos, meandantes, anastomosados e entrelaçados. Em geral, estes tipos morfológicos se desenvolvem como reflexo do aumento da carga sedimentar e da energia do fluxo (Figura 5.2).

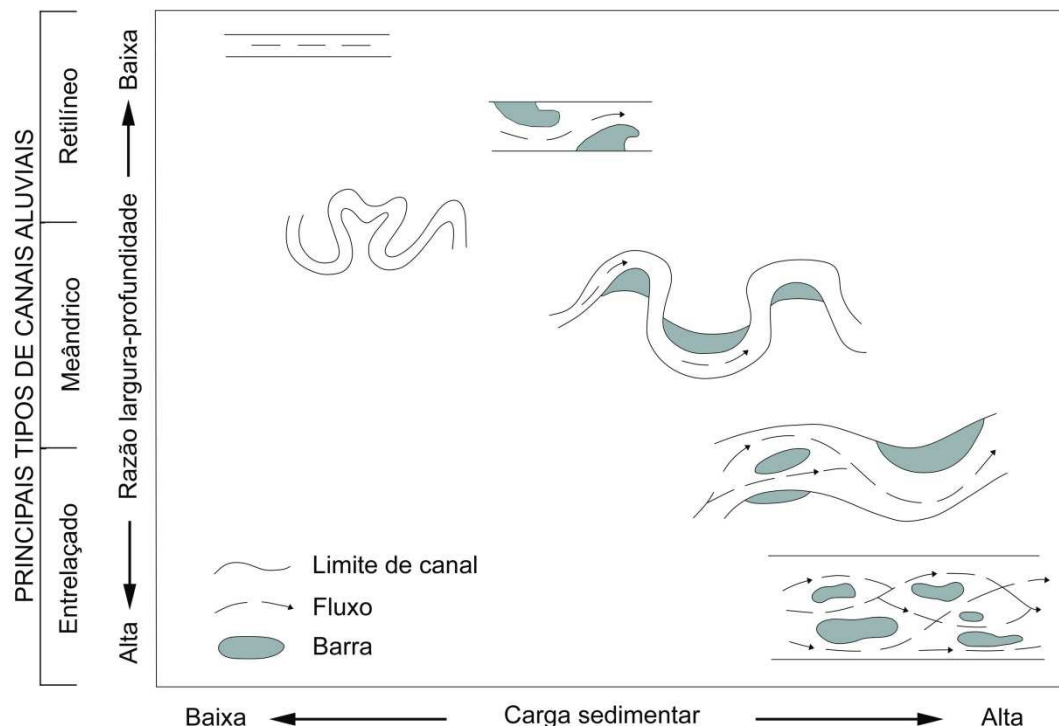


Figura 5.2 - Tipos principais de canais aluviais.

Fonte: Adaptado de Schumm (1981).

Planícies de inundação são áreas rasas e planas que ocorrem entre canais e sujeitas a influxos periódicos quando ocorre transbordamento durante períodos de cheia. Os sedimentos são predominantemente oriundos do canal principal, com contribuições menores de colúvios e sedimentos eólicos (WOLMAN; LEOPOLD, 1957). Adicionalmente, os sedimentos da planície de inundação são constantemente retrabalhados à medida que os canais migram lateralmente (POSAMENTIER; WALKER, 2006).

As planícies de inundação podem conter um complexo de vários subambientes deposicionais, principalmente desenvolvidos em sistemas do tipo meandrante. Estes incluem as planícies propriamente ditas, que se associam a ambientes de diques marginais, lagos e meandros abandonados, além de canais e leques de transbordamento (Figura 5.3). Diques marginais são elevações com topografia ligeiramente convexa para cima que ocorrem nas margens do canal principal, formadas pelo acúmulo de

sedimentos finos durante períodos de cheia dos rios. Lagos são depressões onde ocorre acúmulo de água transbordada dos rios ou formada por precipitação. Concentrações semelhantes de água podem ocorrer, também, na planície de inundação pelo abandono de meandros. Nestes locais subaquosos, a energia do fluxo é baixa, o que favorece deposição lenta de sedimentos granulometricamente finos (WOLMAN; LEOPOLD, 1957). Meandros abandonados são a causa mais comum da formação de lagos de origem fluvial, os quais podem se conectar ao rio principal por canais menores e estreitos. Leques e canais de extravasamento ocorrem quando a vazão do rio aumenta, por exemplo, durante períodos de cheia. Com isto, suas margens sofrem rompimentos localizados, fazendo com que a carga sedimentar seja transportada sobre sedimentos finos da planície de inundação. Sob condições de energia de fluxo elevada, a erosão da planície de inundação é favorecida, surgindo canais secundários. Quando a erosão é insignificante ou ausente, os fluxos se tornam desconfinados, dando origem a leques de transbordamento (PYE, 1994).

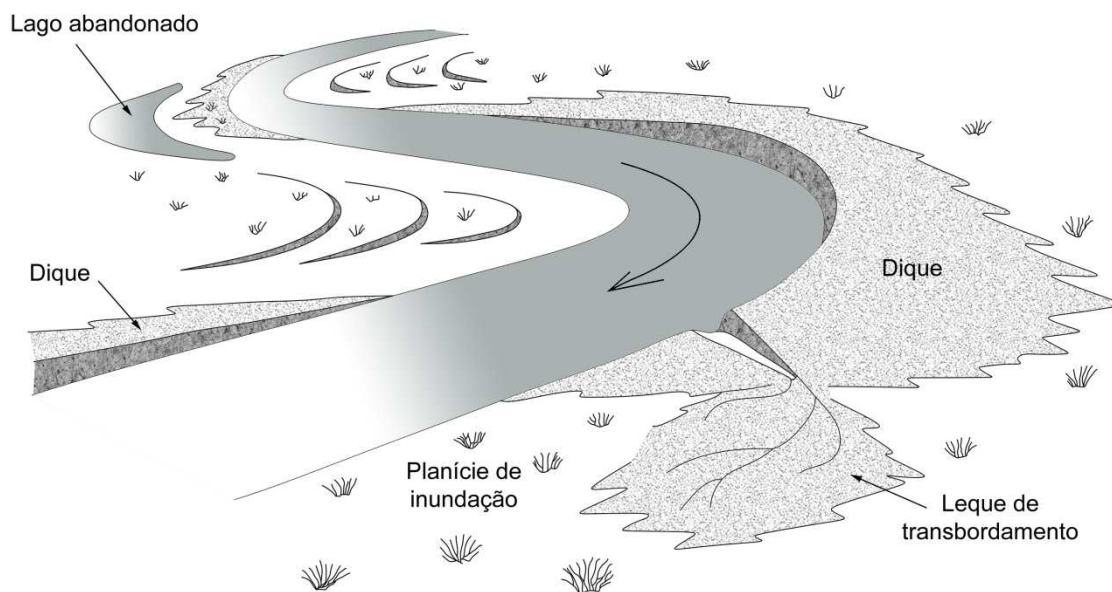


Figura 5.3 - Principais elementos topográficos e subambientes de sedimentação em planícies de inundação.

Fonte: Adaptado de Pye (1994).

Além dos subambientes fluviais supracitados, determinados sistemas fluviais, como o da bacia Amazônica, apresentam feições morfológicas conhecidas como rias fluviais ou vales afogados. Este tipo de morfologia fluvial, considerado uma anomalia de drenagem, consiste em lagos alongados onde ainda se pode reconhecer a morfologia original de tributários fluviais (HOWARD, 1967). As rias podem manter conexão com o canal principal através de um canal estreito ou furo. A ocorrência de rias fluviais em regiões amazônicas tem sido descrita por vários autores (p.e. IRION, 1982, 1984; SIOLI, 1975; LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2002; STERNBERG, 1950; TRICART, 1977), mas sua gênese é ainda tema aberto a discussões. Algumas das hipóteses aventadas por esses autores incluem barragem de desembocaduras de tributários por sedimentos do rio principal devido à própria dinâmica sedimentar, rebaixamento do nível de base em função de transgressões marinhas holocénicas e movimentação de blocos falhados em função de atividade tectônica em tempos geológicos relativamente recentes.

De acordo com Sternberg (1950), as rias fluviais amazônicas podem indicar represamento por soerguimento ou subsidência. Subsidência concomitante a processos de rifteamento podem resultar no afogamento da bacia de drenagem, formando lagos alongados ou rias. Para este mesmo autor, o controle morfotectônico deste tipo de morfologia fluvial é também evidenciado por bordas retilíneas que se interceptam em ângulos retos e formas alongadas seguindo uma orientação preferencial. As rias comumente apresentam déficit aluvial, sendo desprovidas de depósitos de acumulação, como planícies de inundação (TRICART, 1977). Vários autores ressaltam ainda que as orientações de canais de saída e das faces retangulares nas bordas de rias fluviais amazônicas apresentam boa concordância com os lineamentos morfoestruturais de áreas do entorno, reforçando a hipótese de gênese ligada a ajustes tectônicos (FRANZINELLI; IGREJA, 1990; RADAMBRASIL, 1978;). De acordo com Cunha (1982), a ausência de afluentes de grande extensão e o desenvolvimento de drenagens de forma assimétrica nos planaltos adjacentes também indica controle estrutural ligado aos processos de implantação de rias fluviais amazônicas.

5.1.2 Paleomorfologias

Morfologias fluviais pretéritas ou paleomorfologias consistem em feições geomórficas originadas por deposição e erosão aluvial, em tempos geológicos anteriores ao atual.

O abandono de canais, principais ou secundários, bem como de lagos e meandros, em tempos quaternários, pode gerar feições que são ainda passíveis de reconhecimento na paisagem atual. Canais fluviais abandonados ou paleocanais podem variar em relação à idade. Paleocanais abandonados em tempos geológicos recentes incluem antigos meandros e trechos de canais abandonados, em geral, por avulsão (GOUDIE, 2004). Avulsões ocorrem usualmente por agradação da planície de inundação, o que força os canais a encontrarem outras áreas de topografia relativamente inferior. Enquanto a agradação de muitas planícies de inundação pode ter causa intrínseca aos processos deposicionais, são comuns avulsões geradas por processos alóctones, seja por efeito climático, seja pela movimentação tectônica (BURBANK; ANDERSON, 2001).

Paleomorfologias fornecem importantes informações para estudos de evolução de sistemas fluviais, como reconstituição paleogeográfica de redes de drenagem a partir de paleocanais preservados na paisagem atual. Em áreas amazônicas, feições paleomorfológicas quaternárias podem ser ressaltadas por contrastes vegetacionais e/ou topográficos, facilitando seu reconhecimento a partir de dados de sensoriamento remoto, visto a escala geográfica destas feições (ROSSETTI et al., 2008). Complementarmente a investigações sedimentológicas em campo, estudos de paleomorfologias são baseados na análise morfológica destas feições. Morfologias de paleocanais, por exemplo, podem fornecer indícios sobre o regime de vazão, sedimentos e morfologia em antigos sistemas fluviais a partir da análise de suas dimensões, forma e padrões de drenagem (BENITO et al., 1998).

5.2 Sensoriamento Remoto

5.2.1 Detecção de paleomorfologias

A utilização de imagens orbitais para o reconhecimento de paleomorfologias tem sido registrada em diversos trabalhos (p.e. MCCAULEY et al., 1982, 1986; MCHUGH et al., 1988). O mapeamento de canais e meandros abandonados em regiões tropicais úmidas

vem sendo feito com imagens ópticas (p.e. Landsat) (RAMASANY et al., 1991; YASH PAL et al. 1980). De acordo com Mitra et al. (2005), este tipo de abordagem permite a interpretação de eventos recentes ocorridos na superfície, como migração e avulsão de canais fluviais, fornecendo a compreensão da evolução dos sistemas de drenagem.

De acordo com Addink e Kleinhans (2008), a utilização de imagens ópticas para o mapeamento de morfologias fluviais atuais e pretéritas deve ser realizada com cautela em locais de clima tropical úmido. Isto se deve à grande heterogeneidade de valores espectrais apresentada por essas imagens neste tipo de ambiente, o que dificulta a detecção de paleomorfologias cobertas por vegetação e água, como meandros abandonados e recém-abandonados. No caso de áreas equatoriais úmidas, como na Amazônia, imagens ópticas tem auxiliado na identificação de contrastes vegetacionais abruptos associados a canais abandonados durante o Quaternário tardio (HAYAKAWA et al., 2009, 2010a; ROSSETTI, 2010). Este tipo de abordagem é de grande interesse para detecção de paleomorfologias em áreas densamente vegetadas. Entretanto, os autores ressaltam que imagens ópticas não possibilitaram a detecção de contrastes vegetacionais relativamente mais sutis, principalmente entre vegetações florestais, os quais podem também estar associados à paleomorfologias.

Paralelamente à utilização de imagens ópticas para o mapeamento de paleomorfologias, diversos autores tem utilizado produtos obtidos por imageadores SAR (*Synthetic Aperture Radar*), as quais provaram ser de grande utilidade no caso de ambientes áridos e semi-áridos (PAILLOU et al., 2009). Isto se deve à sensibilidade destes às propriedades elétricas e geometria dos alvos, como conteúdo de água e rugosidade, respectivamente. Outros autores integraram imagens SAR e ópticas para o mapeamento de paleomorfologias em regiões de clima tropical seco (p.e. DOYLE; INGGS, 1998). Este tipo de abordagem visa aumentar a detecção de paleomorfologias por meio da combinação de informações derivadas de produtos com características distintas. Trabalho realizado em região no sudoeste da Amazônia, de clima equatorial úmido, reforçou a necessidade de integração entre imagens ópticas e imagens SAR para a visualização de paleomorfologias (HAYAKAWA et al., 2010b).

Complementarmente ao que foi exposto acima, estudos recentes tem mostrado que a utilização de MDE obtido a partir de interferometria SAR, como MDE-SRTM, permite

ampliar sensivelmente a detecção de paleomorfologias em regiões amazônicas com base em gradientes altitudinais (p.e. ALMEIDA-FILHO; MIRANDA, 2007; HAYAKAWA et al., 2010a; MANTELLI, 2008; ROSSETTI; VALERIANO, 2007). De acordo com Mantelli et al. (2009), estes contrastes altitudinais podem ser resultantes de diferenciações topográficas no terreno e/ou de variações da altura dos dosséis florestais. Rossetti (2010) adverte que MDE-SRTM auxiliam a detecção e caracterização de paleomorfologias em áreas amazônicas, mas outros dados de sensoriamento como imagens ópticas e imagens SAR, devem ser utilizados de forma complementar a fim de ampliar a visualização destas feições nos diversos ambientes amazônicos. Isto se deve às diferentes idades e dimensões, bem como dos contextos geológicos e geomorfológicos em que elas ocorrem.

Além da avaliação dos produtos de sensoriamento remoto mais adequados à detecção de paleomorfologias em regiões amazônicas, outro aspecto que deve ser ponderado refere-se às técnicas usadas para sua extração. A partir destas, a extração manual, principalmente quando realizada a partir da interpretação visual de dados de sensoriamento remoto com características distintas, pode ser custosa em tempo. Apesar de este esforço gerar resultados satisfatórios, o que explica sua utilização em trabalhos recentes, é importante testar técnicas que agilizem seu mapeamento, principalmente em grandes áreas. Os produtos gerados, por sua vez, podem ser utilizados com outros mapas temáticos ou informações espaciais sobre os demais elementos que compõem um sistema fluvial.

5.2.2 Mapeamento de vegetação

Dada a hipótese de associação direta entre paleomorfologias e padrões vegetacionais sugeridas para outras áreas amazônicas, grande parte deste estudo enfocará o mapeamento de vegetação. Portanto, é necessária uma revisão dos principais métodos utilizados para isto.

De acordo com Nordberg e Evertson (2003), métodos clássicos (e.g. levantamento de campo, interpretação visual de fotografias aéreas) utilizados para mapeamento de vegetação podem não ser eficientes em estudos regionais, devido ao alto custo e consumo de tempo necessário à sua execução. Tecnologias de processamento de

imagens, por outro lado, oferecem métodos práticos e econômicos para estudos de vegetação, especialmente em grandes áreas.

O conhecimento da interação entre radiação solar e a vegetação é fundamental para utilização de técnicas de sensoriamento remoto na extração de tipos vegetacionais. Esta interação, que ocorre de forma complexa, é responsável pela reflectância da vegetação detectada por sensores ópticos a bordo de plataformas orbitais (JENSEN, 2007). De acordo com este autor, os valores de reflectância obtidos por sensores remotos são derivados da radiação solar que incide principalmente sobre as folhas, sendo esta refletida ou absorvida. O estudo do mecanismo de reflectância foliar em dados de sensoriamento remoto dá-se, principalmente, no intervalo entre 0,4 e 2,7 μm do espectro eletromagnético porque a radiação solar incidente ocorre de forma predominante neste intervalo.

Em termos gerais, a folha possui baixos valores de reflectância para a porção do visível do espectro eletromagnético, devido à alta absorção por seus pigmentos, especialmente pela clorofila. Valores de reflectância são relativamente mais altos no infravermelho próximo, em virtude do espalhamento da radiação pelos espaços vazios localizados entre as estruturas internas da folha, bem como da baixa absorção. No infravermelho com comprimentos de onda maiores que 1,3 μm , a folha terá valores de reflectância relativamente baixos em razão da alta absorção por moléculas de água (KNIPLING, 1970).

A reflectância de um dossel vegetal assemelha-se, em alguns aspectos, à reflectância de uma única folha, mas sofre influência da incidência não uniforme da radiação solar. De maneira geral, ocorre atenuação natural da radiação por variações no ângulo de iluminação, disposição geométrica da estrutura do dossel, orientação e área das folhas, sombras e interferências de superfícies de fundo (p.e. solo). Sob dosséis florestais, há uma redução ainda maior dos valores de reflectância para a porção do visível do espectro eletromagnético em relação à porção do infravermelho próximo. Isto ocorre porque a radiação do infravermelho próximo que foi transmitida para estratos foliares inferiores é refletida aos estratos superiores. Apesar de esta condição ser parcialmente compensada pelo deslocamento do pico da energia incidente para a região do visível, a

reflectância na região do infravermelho é, ainda, significativamente maior em relação à região do visível (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Os valores de reflectância nas regiões do vermelho e infravermelho próximo podem ser obtidos por imagens fornecidas por sensores multiespectrais ou hiperespectrais, sendo também incorporados na forma de Índices de Vegetação (IV). Estes estão diretamente relacionados à fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (GLENN et al., 2008). A escolha de imagens para o mapeamento da vegetação depende, primeiramente, do objetivo e exatidão esperada, embora condições climáticas (especialmente atmosféricas) e características como a data das imagens, custo e propriedades do meio físico local também devam ser consideradas (XIE et al., 2008).

Dentre as imagens utilizadas em mapeamentos de vegetação em escala regional destacam-se imagens multiespectrais fornecidas pelos sensores TM (*Thematic Mapper*) e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*). Estes sensores, que atualmente estão a bordo dos satélites Landsat-5 e Landsat-7, respectivamente, possuem algumas limitações, como a média resolução espacial das bandas multiespectrais (30 metros) e sua baixa resolução temporal (16 dias). Entretanto, estes dados têm sido aplicados, com sucesso, em mapeamentos de vegetação, principalmente em nível de comunidades vegetais, com exatidão média a alta (COLSTOUN et al., 2003; SALOVAARA et al., 2005). Adicionalmente, imagens Landsat tem registro de séries temporais para os últimos 27 anos, além de serem distribuídas gratuitamente.

Vale ressaltar que trabalhos recentes têm sugerido a utilização de imagens SAR, complementarmente a imagens ópticas para mapeamento de comunidades vegetais (IMHOFF et al., 1997; SANO et al., 2005; SANTOS et al., 2002). Estas imagens podem ser particularmente úteis em áreas de vegetação florestal, principalmente quando obtidas por sensores operantes na banda L (23.5 cm) devido à maior sensibilidade destes dados à estrutura da floresta e, principalmente, da menor restrição de uso destas imagens na presença de nebulosidade. Por outro lado, questões técnicas relacionadas ao nível de complexidade envolvido no processamento e interpretação deste tipo de imagem também devem ser consideradas.

5.2.3 Dados orbitais

O presente item descreve as características principais dos dados de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho. Estes consistem de MDE-SRTM e imagens Landsat, visto sua importância no mapeamento de paleomorfologias e vegetação, além da facilidade de obtenção e interpretação.

5.2.3.1 MDE-SRTM

Desenvolvido a partir de uma parceria entre a NASA, o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Agência Espacial Italiana (ASI), a SRTM foi uma missão que utilizou um sistema InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) para adquirir dados topográficos da superfície terrestre compreendida entre as latitudes 60°N e 57°S. Esta missão, realizada em fevereiro de 2000, ocorreu a bordo do veículo espacial *Endeavour*, tendo envolvido dois interferômetros operando nas bandas C (5.6 cm) e X (3.2 cm), sendo os dados coletados a partir de duas antenas operadas simultaneamente (*single-pass interferometry*).

Como o sistema SAR é um sistema de imageamento coerente, ou seja, capaz de gravar a fase da onda recebida e de preservá-la durante todas as etapas de processamento, a técnica de interferometria SAR utiliza a informação de fase de cada pixel para medir as paralaxes e estimar sua altitude relativa. Dessa forma, os dados SRTM permitiram a obtenção de MDE global de alta qualidade. Dados coletados na banda C estão disponíveis gratuitamente com espaçamento horizontal de 1 arco-segundo (~30 m) para o território dos EUA, e de 3 arco-segundo (~90 m) para o restante da superfície terrestre. Os valores de elevação são expressos em metros inteiros e o sistema de datum vertical e horizontal utilizado é o WGS84 (RABUS et al., 2003).

O sucesso dos dados SRTM incentivou a criação de outros conjuntos de dados derivados destes. Para o território brasileiro, destacam-se os dados produzidos pelo projeto Topodata (VALERIANO; ROSSETTI, 2010). Esses dados correspondem a MDE-SRTM interpolados por krigagem, com resolução aproximada de 1 arco-segundo (~30m), e subprodutos que incluem declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e horizontal, bem como insumos para o delineamento da estrutura de drenagem

e formas de relevo (MUNHOZ, 2009). O processo de refinamento dos dados SRTM foi dirigido à obtenção do máximo detalhamento que não produzisse ruídos não-topográficos, preservando características geométricas de detalhe do MDE original. Por essa razão, características exibidas pela superfície, como a relação relevo-dossel, foram mantidas devido a sua importância na identificação de características geológicas, pedológicas, vegetacionais, entre outras, pelo usuário (VALERIANO; ROSSETTI, 2010). Os dados Topodata, juntamente com especificações técnicas, etapas de processamento e orientações aos usuários podem ser acessados livremente em <http://www.dsr.inpe.br/topodata>.

5.2.3.2 Imagens Landsat

Os satélites Landsat-5 e Landsat-7 são de particular interesse em estudos morfológicos e vegetacionais, por possuírem a bordo os sensores multiespectrais TM e ETM+, respectivamente. Estes sensores consistem em instrumentos imageadores ópticos capazes de adquirir imagens em sete bandas espectrais, das quais três compreendem a região do visível do espectro eletromagnético, uma região do infravermelho próximo, duas na região do infravermelho médio e uma na região do termal.

Com faixa (*swath*) de imageamento de 185 km, os sensores acima descritos apresentam resolução espacial de 30 m x 30 m, para as bandas que operam nas regiões do visível e infravermelho refletido. Para a região do infravermelho termal, a resolução espacial é de 120 m x 120 m no caso do sensor TM e 60 x 60 m para o ETM+, o qual também adquire uma banda pancromática com resolução de 15 m (JENSEN, 2007). Os sensores TM e ETM+ possuem um nível de quantização de 256 números digitais (8 bits), fornecendo imagens com satisfatória sensibilidade a mudanças radiométricas de pequena magnitude entre as bandas para aplicações em agricultura, estudos hidrológicos, mapeamento de vegetação, dentre muitas outras (LILLESLAND et al., 2008).

5.2.4 Classificação de imagens

A classificação de imagens de sensoriamento remoto pode ser definida como a categorização das informações presentes nos pixels em classes temáticas. Uma das

abordagens mais comuns de classificação de imagens multiespectrais consiste na utilização de algoritmos computacionais estatisticamente fundamentados para determinar o tipo de cobertura ou uso que determinado pixel possui (MATHER, 2004).

Paralelamente ao desenvolvimento de métodos de classificação de imagens de sensoriamento remoto, a multiplicidade de dados geoespaciais disponíveis tem sido cada vez maior nos últimos anos, particularmente relativo à disponibilização de imagens com melhores resoluções espaciais. A necessidade de detecção de objetos ou alvos maiores que pixels únicos tem se tornado frequente, principalmente devido à heterogeneidade e complexidade de algumas dessas imagens (BLASCHKE et al., 2000).

Complementarmente, alguns autores ressaltam que a utilização de técnicas de classificação locais (pixel-a-pixel) pode limitar a modelagem de classes em função apenas de características espectrais e do comportamento estatístico, desconsiderando, dessa forma, as características ou comportamentos espaciais presentes na imagem (BLASCHKE; STROBL, 2001). Esses mesmos autores sugeriram a utilização de métodos de classificação de imagens que possam incluir relações topológicas ou de vizinhança entre os pixels.

Dentre as abordagens de análise e classificação de imagens que representam uma alternativa a métodos tradicionais (locais) destaca-se a Análise Orientada a Objeto (AOO). De acordo com Blaschke (2010), a utilização da técnica de AOO para classificação de imagens de sensoriamento remoto tem se tornado bastante popular em comparação aos métodos locais. O conceito fundamental vinculado a esta técnica consiste na delimitação de objetos ou segmentos nas imagens digitais, que correspondem a regiões homogêneas constituídas de muitos pixels (NAVULUR, 2007).

A utilização da técnica de AOO para classificação de imagens permite que informações adicionais relacionadas às propriedades dos objetos ou segmentos, ou seja, de um conjunto de pixels, sejam utilizadas para melhor detecção e descrição desses objetos. Em termos gerais, estas informações podem ser divididas em dois grupos: 1) características intrínsecas aos objetos, como propriedades espectrais, textura e geometria; e 2) características de inter-relação entre objetos, como conectividade entre objetos e proximidade de objetos semelhantes (BENZ et al., 2004).

Outro ponto fundamental é o papel da AOO na convergência entre técnicas de análise de imagens espectrais de sensoriamento remoto (p.e. imagens ópticas), não-espectrais (p.e. MDE e dados geomorfométricos), e dados geoespaciais na forma de vetores, como pontos, linhas ou polígonos (BAATZ et al., 2008; HAY; CASTILLA, 2008; LU; WENG, 2007; STROBL, 2008). De acordo com esses autores, isto permite que características destes diferentes dados sejam exploradas simultaneamente no processo de classificação, resultando no aumento da sua exatidão. Burnett e Blaschke (2003) também destacam que esta integração entre dados com diferentes características e resoluções espaciais está indissolivelmente relacionada à percepção de objetos em múltiplas escalas. Esta integração ocorre por meio da utilização de algoritmos de segmentação específicos, bem como de atributos relativos às propriedades de objetos que permitam relacioná-los, mesmo que pertençam a níveis de segmentação diferentes.

A utilização de atributos dos objetos obtidos a partir de segmentação pode ser realizada de diferentes maneiras. As propriedades dos objetos podem ser exploradas, por exemplo, por meio do próprio conhecimento do analista, o qual define atributos e valores pertinentes à descrição de determinada classe. Por outro lado, a utilização de classificação por árvore de decisão (*Machine Learning Decision Tree*) tem ganhado grande espaço em aplicações geocomputacionais (p.e. FRIEDL; BRODLEY, 1997; HUANG; JENSEN, 1997; MAHESH; MATHER, 2004; MUCHONEY et al., 2000). Isto se deve, principalmente, à simplicidade e rapidez desta técnica para a obtenção de modelo preditivo aplicado a distinção de classes a partir de conjuntos de amostras de treinamento.

Classificadores por árvore de decisão são considerados não-métricos (opostamente a classificadores paramétricos e não-paramétricos). Contrariamente às técnicas estatísticas tradicionais, estes classificadores não fazem suposição prévia sobre a distribuição ou independência dos dados (HUANG et al., 2001). O algoritmo C4.5 (QUINLAN, 1993) tem sido utilizado amplamente para classificação de imagens de sensoriamento remoto (ver SINHA, 2006), apesar de não ter sido desenvolvido especificamente para este fim. Este algoritmo gera árvores de decisão a partir de amostras de treinamento, sendo que os atributos mais eficientes para descrição das classes são selecionados para cada nó desta árvore com base no conceito de entropia. Atributos com mínima entropia têm, em

média, mais informação única que atributos com alta entropia e, portanto, são mais adequados para subdividir o conjunto de dados em grupos distintos (HUANG et al., 2001). Os atributos e valores gerados na árvore de decisão, por sua vez, são facilmente convertidos em regras de classificação.

De acordo com Im et al. (2008), as regras de classificação obtidas por meio da técnica de classificação por árvore de decisão não são regras mutuamente exclusivas ou coletivamente exaustivas. Isto se deve ao fato de que determinado nível de confiança e uma classe padrão são utilizados no procedimento de eleição de atributos, assegurando que a inferência de regras seja de sucesso. Esta abordagem garante a não sobreposição entre atributos, o que resulta em seleção eficiente destes, mesmo para grandes conjuntos de dados. Porém, Huang et al. (2001) ressaltam que as regras de classificação não produzem, necessariamente, respostas definitivas a determinado problema. Por esta razão, outras técnicas estatísticas devem ser utilizadas para avaliação da exatidão do modelo preditivo obtido.

A partir do exposto acima, na AOO, a segmentação das imagens em objetos múltiplos é indissociável do processo de classificação. Similarmente, a descrição das propriedades destes objetos (atributos) permite agrupá-los em classes.

5.2.5 Técnicas de segmentação de imagens

A segmentação de imagens consiste em sua subdivisão em múltiplas unidades ou segmentos menores. Estes segmentos devem ser homogêneos em relação às características que os tornam uniformes, como tons de cinza e textura, e os limites entre eles devem ser simples, regulares, e espacialmente exatos (HARALICK; SHAPIRO, 1985). A segmentação de imagens não é um conceito novo, entretanto, a sua utilização em aplicações de sensoriamento remoto tem crescido significativamente, o que estimula o desenvolvimento contínuo de novas técnicas de segmentação (BLASCHKE et al., 2004).

Há uma grande variedade de técnicas de segmentação de imagens, algumas consideradas de uso geral e outras designadas para classes específicas de imagens. Entretanto, estas técnicas, que dependem da natureza específica do problema a ser

resolvido, diferem precisamente na maneira como enfatizam uma ou mais propriedades desejadas e como transigem uma determinada propriedade da imagem em relação à outra (PAL; PAL, 1993). Objetos reais a serem representados pelos segmentos ou objetos são usualmente compostos por vários pixels (BLASCHKE; STROBL, 2001). Consequentemente, é desejável, em alguns casos, que determinados segmentos permaneçam separados ou que sejam fusionados, não em função da distribuição dos tons de cinza ou textura, e sim de outras características que melhor os definam nas imagens (BLASCHKE et al., 2004).

Um importante avanço na ampliação das medidas estatísticas de homogeneidade espectral e de textura entre segmentos foi alcançado com o desenvolvimento do algoritmo de segmentação multirresolução (BAATZ; SCHÄPE, 2000). Este algoritmo permite incorporar dimensões espaciais por meio de medidas de escala e forma no processo de segmentação de imagens, favorecendo a delimitação de objetos reais em paisagens complexas presentes nas diversas classes de imagens de sensoriamento remoto. A inclusão destas dimensões tem sido um marco na classificação de imagens utilizando técnicas de AOO (DE JONG; VAN DER MEER, 2004).

O algoritmo de segmentação multirresolução de Baatz e Schape (2000) foi incorporado ao aplicativo *eCognition* (FLANDERS et al., 2003), posteriormente renomeado para *Definiens Developer* (LANG; TIEDE, 2007) e chamado neste trabalho de DEFINIENS. A utilização deste algoritmo neste tipo de interface facilitou ao usuário imbuir informações de caráter semântico pelo ajuste dos diferentes parâmetros disponíveis no processo de segmentação. Este tipo de abordagem resulta em um aumento do grau de entendimento das imagens (LANG, 2008). Adicionalmente, este segmentador pode ser aplicado no nível de pixels ou objetos pré-existent, abrangendo imagens com diferentes resoluções espaciais simultaneamente (SCHIEWE et al., 2001).

A segmentação tem sido relatada como um processo de cunho indutivo, em que cada resultado é avaliado qualitativamente ou quantitativamente até a obtenção dos segmentos desejados (BLASCHKE; HAY, 2001). De acordo com Esch et al. (2008), o segmentador multirresolução permite que o usuário defina valores específicos para critérios de homogeneidade, como Cor (h_c) e Forma (h_s), sendo o último composto por Suavidade (h_{ss}) e Compacidade (h_{sc}):

$$h_c = \sum_b w_b * \sigma_b$$

Onde w_c define o peso e σ_c o desvio-padrão da banda b , e:

$$h_{ss} = \frac{l}{k}$$

Onde l fornece o comprimento real do contorno do objeto e k produz o menor perímetro envolvente, e:

$$h_{sc} = \frac{l}{\sqrt{n}}$$

Onde l representa o comprimento do contorno ou perímetro do objeto e n o número de pixels do objeto. Após cada fusão entre objetos, a mudança da heterogeneidade, que flui para o valor fusão S_r , é calculada por:

$$S_r = w_s h_c + (1 - w_s) h_s$$

Onde w_s representa o fator de peso do critério Forma definido pelo usuário. O valor fusão é comparado com o parâmetro Escala, definido pelo usuário pela máxima heterogeneidade permitida para os objetos da imagem.

A partir do exposto acima, nota-se que é possível atribuir valor ou peso (w_c) a determinada banda (b). Isto deve ser realizado em função do grau de importância desta para discriminar objetos de interesse. Esta seleção prévia de bandas favorece a obtenção de melhores resultados por meio da exclusão de informações potencialmente irrelevantes (HAMILTON et al., 2007).

O ajuste do critério Forma melhora, frequentemente, a qualidade de extração de objetos (NAVULUR, 2007). Isto porque objetos espaciais tendem a ser geometricamente compactos. Este critério funciona de forma complementar ao critério Cor, o qual se resume no cálculo de informações representadas pelos valores dos pixels, ou espectrais.

Conforme estas informações espectrais são enfatizadas, a obtenção de objetos geometricamente compactos e com bordas suaves é desfavorecida.

Adicionalmente, o aumento dos valores do critério Compacidade pelo intérprete implica na diminuição do critério Suavidade. Os critérios Compacidade e Suavidade favorecem formas geometricamente compactas e bordas com limites pouco rugosos ou suaves, respectivamente. Estas características, entretanto, são utilizadas de forma complementar, porém, não antagônica, como ocorre com os critérios Forma-Cor. Portanto, valores altos de Compacidade não implicam necessariamente em bordas rugosas ou pouco suaves (BENZ et al., 2004). Complementarmente, o parâmetro Escala deve ser ajustado em função da resolução espacial dos dados e, principalmente, da relação entre o tamanho dos objetos resultantes e da escala das feições ou regiões de interesse (ADDINK et al., 2007).

6. MATERIAIS

Os dados de sensoriamento remoto utilizados como fonte primária de informações para realização deste trabalho incluíram:

6.1. Dados topográficos digitais

Foram utilizados dados do projeto Topodata (ver item 5.2.3.1), na sua segunda versão, para a área de estudo. Estes dados, que serão chamados neste trabalho de MDE, tem tamanho de pixel de aproximadamente 1-arco-segundo ($0,2777''$) ou $\sim 30\text{m}$ (VALERIANO; ROSSETTI, 2010).

6.2. Imagens ópticas

Estas consistem em quatro cenas adquiridas pelo sensor ETM+ do satélite Landsat-7 em datas próximas ao vôo da missão SRTM (Tabela 6.1), excluindo-se as bandas da região espectral do azul, infravermelho termal e do pancromático (Tabela 6.2). Essas imagens fazem parte do arquivo global do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e seu acesso é livre no endereço eletrônico <http://eros.usgs.gov/>. As imagens são corrigidas e geometricamente corrigidas, com nível de processamento L1T (mais informações disponíveis em: http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php). A localização das cenas Landsat-7/ETM+ em relação à área de estudo é mostrada na Figura 6.1.

Tabela 6.1 - Landsat-7/ETM+ utilizadas nesta pesquisa.

Satélite	Sensor	Data de aquisição	Órbita	Ponto
Landsat-7	ETM+	02/08/2001	232	65
Landsat-7	ETM+	02/08/2001	232	66
Landsat-7	ETM+	22/08/2000	233	65
Landsat-7	ETM+	22/06/2001	233	66

Tabela 6.2 - Bandas espectrais das imagens Landsat-7/ETM+ utilizadas neste trabalho.

Bandas	Região do Espectro Eletromagnético	Resolução
ETM2	Verde (0.525 - 0.605 μm)	30 m
ETM3	Vermelho (0.63 - 0.69 μm)	30 m
ETM4	Infravermelho próximo (0.75-0.90 μm)	30 m
ETM5	Infravermelho médio (1,55 - 1,75 μm)	30 m
ETM7	Infravermelho médio (2.09 - 2,35 μm)	30 m

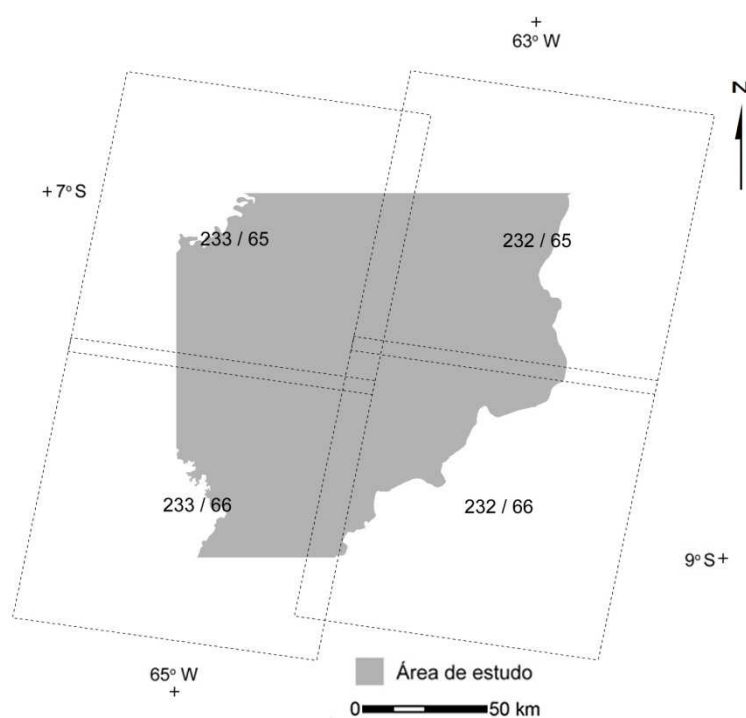


Figura 6.1 - Localização das cenas Landsat-7/ETM+ em relação a área de estudo.

6.3. Dados cartográficos

Complementarmente aos dados de sensoriamento remoto, foram utilizados dados cartográficos disponíveis na literatura. Esses consistem em arquivos digitais de cartas topográficas na escala 1:100.000. As folhas utilizadas foram listadas na Tabela 6.3 e os arquivos digitais correspondentes podem ser acessados livremente em <http://mapas.mma.gov.br/geodados/download/basecarto/index.html>.

Tabela 6.3 - Cartas topográficas utilizadas como base de dados nesta pesquisa.

ÍNDICE DE NOMENCLATURA	NOME DA CARTA	ANO DE IMPRESSÃO	ESCALA
SC-20-X-A-IV	RIO PRETO	1984	1:100 000
SC-20-V-A-VI	RIO PUNICICI	1984	1:100 000
SC-20-V-B-IV	RIO MUCUIM	1982	1:100 000
SC-20-V-B-V	PORTO VELHO	1980	1:100 000
SC-20-X-A-I	CALAMA	1984	1:100 000
SB-20-Y-C-III	LABREA	1979	1:100 000
SB-20-Y-D-I	CRISTO	1982	1:100 000
SB-20-Y-D-II	FAZENDA JAURI	1982	1:100 000
SB-20-Y-D-III	LAGOA PURUZINHO	1979	1:100 000
SB-20-Z-C-I	LAGOA TRES CASAS	1979	1:100 000
SB-20-Y-C-VI	IGARAPÉ PUCIARI	1984	1:100 000
SB-20-Y-D-IV	IGARAPÉ MATRINCHÃ	1982	1:100 000
SB-20-Y-D-V	RIO AÇUÃ	1982	1:100 000
SB-20-Y-D-VI	HUMIATÁ	1979	1:100 000
SB-20-Z-C-IV	LAGOA PARAÍSO	1980	1:100 000
SC-20-V-A-III	CACHOEIRA DO PILÃO	1984	1:100 000
SC-20-V-B-I	RIO INACORRÃ	1982	1:100 000
SC-20-V-B-II	SOBRAL	1982	1:100 000
SC-20-V-B-III	SÃO JOSÉ DA PRAIA	1982	1:100 000
SC-20-V-B-VI	RIO VERDE	1982	1:100 000

7. MÉTODOS

A metodologia utilizada para realização deste trabalho envolveu quatro etapas que correspondem a: (i) extração da rede de drenagem atual; (ii) extração de segmentos de vegetação de interesse com base em dados de sensoriamento remoto; (iii) levantamento topográfico em campo; e (iv) caracterização dos segmentos de vegetação. As principais atividades realizadas durante estas etapas podem ser visualizadas na Figura 7.1.

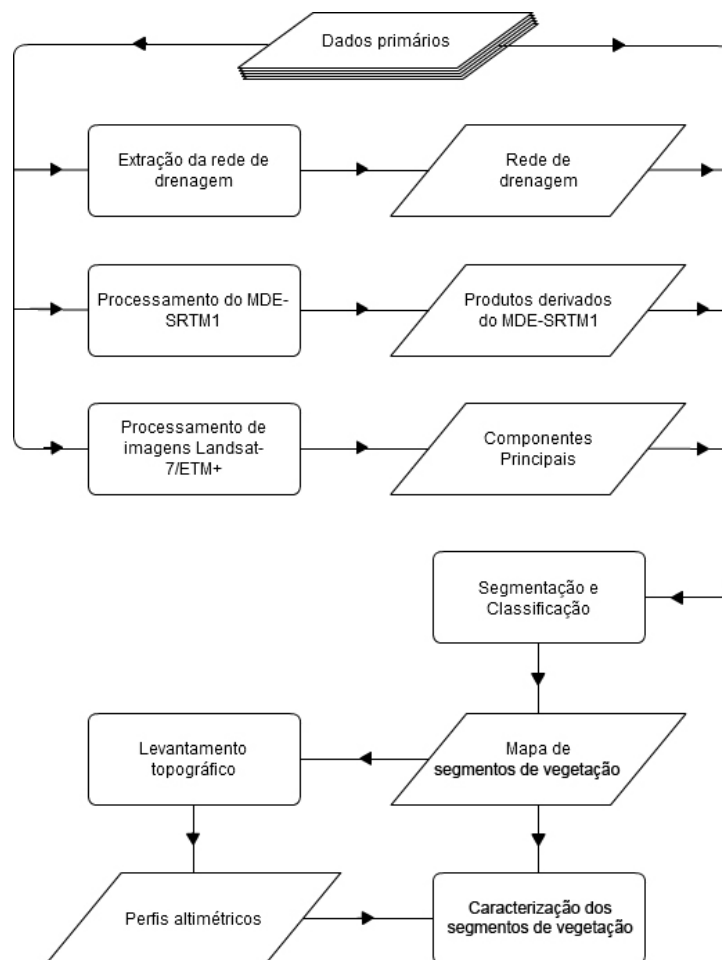


Figura 7.1 - Fluxograma ilustrando as principais atividades realizadas durante a aplicação da metodologia, mostrando processos e produtos obtidos.

7.1. Extração da rede de drenagem atual

Esta fase incluiu a extração da rede de drenagem atual para a área de estudo. Para isto, foram combinadas informações dos diferentes dados disponíveis em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Esta combinação baseou-se na utilização de planos de informação (PI) pré-existent, correspondentes a vetores digitais de cartas topográficas na escala 1:100.000, e de dados de sensoriamento remoto para correção destes vetores e criação de novos segmentos. Inicialmente, avaliou-se visualmente os vetores de cursos fluviais das cartas topográficas, buscando-se validar estes dados nos dados de sensoriamento remoto. A partir da maior ou menor compatibilidade entre os dados, foram realizadas edições manuais dos vetores, assim como a complementação dos mesmos, quando necessário. Para isto, foram utilizadas composições coloridas de imagens Landsat para cursos fluviais maiores e mais longos e dados MDE para cursos fluviais menores.

7.2. Extração de segmentos de vegetação com base em sensoriamento remoto

Esta etapa foi subdividida em outras duas etapas que incluem: i) pré-processamento e transformações dos dados de sensoriamento remoto; e ii) classificação de imagens de sensoriamento remoto.

7.2.1 Pré-processamento e transformações

A segmentação e classificação das imagens de sensoriamento remoto foram precedidas por etapas de pré-processamento e transformações destas imagens. Primeiramente, foi realizado mosaico das imagens ópticas ou imagens Landsat-7/ETM+. Este procedimento englobou contrastes lineares e equalização de histogramas para cada banda multiespectral em função da mesma banda para as cenas adjacentes. A partir das bandas multiespectrais mosaicadas, foi realizada transformação de Componentes Principais. Esta transformação, que teve como objetivo reduzir a variância das bandas espectrais, foi realizada de forma a priorizar a detecção de segmentos de vegetação aberta. Para isto, o ângulo de rotação da primeira componente foi definido em função da inclinação da reta correspondente a maior dispersão dos valores de amostras de áreas de vegetação aberta coletadas diretamente sobre as imagens Landsat-7/ETM+.

Além disto, processamentos adicionais foram realizados a partir dos valores do MDE com objetivo de realçar contrastes altitudinais de maior magnitude entre pixels vizinhos através da suavização de contrastes de menor magnitude, realçando áreas de interesse no MDE posteriormente utilizado no processo de classificação. Este procedimento consistiu da transformação dos valores de elevação de modo que os limites entre máximos e mínimos fosse suavizado localmente, propiciando que o contexto regional da topografia seja mais bem refletido em detrimento da informação geométrica. Foi elaborado um método computacional indireto específico que, através de uma série de operações aritméticas, proporciona mudanças na graduação espacial dos valores de altitude sem prejudicar a localização de baixos (mínimos) de maior interesse. Esta transformação dos valores de elevação consistiu, inicialmente, da aplicação de um operador de vizinhança ao MDE, como mostra a equação a seguir:

$$Z_{i,j} = Zo_{i,j} - \bar{Z}$$

Onde $Z_{i,j}$ é o valor resultante para determinado pixel localizado nas coordenadas i,j da grade de pixels do MDE; $Zo_{i,j}$ é o valor inicial deste mesmo pixel; e $\bar{Z}$ é a média dos valores dos pixels localizados dentro de uma janela de busca ao redor deste pixel. Esta janela possui formato anular, com raio interno de dimensão de um pixel e externo de cinco pixels (Figura 7.3-a). Os valores resultantes $Z_{i,j}$ foram, então, deslocados para valores positivos, maiores ou iguais a zero ($Z'_{i,j}$). Estes, por sua vez, foram subtraídos dos valores iniciais ou valores dos pixels do MDE ($Zo_{i,j}$), como mostra a equação seguinte:

$$Zf_{i,j} = Zo_{i,j} - Z'_{i,j}$$

Onde $Zf_{i,j}$ é o valor resultante para o pixel i,j no MDE processado ou MDE'. As operações realizadas acima são ilustradas na Figura 7.2 e o resultado final na superfície do MDE após a transformação dos valores é esquematizado na Figura 7.3-b.

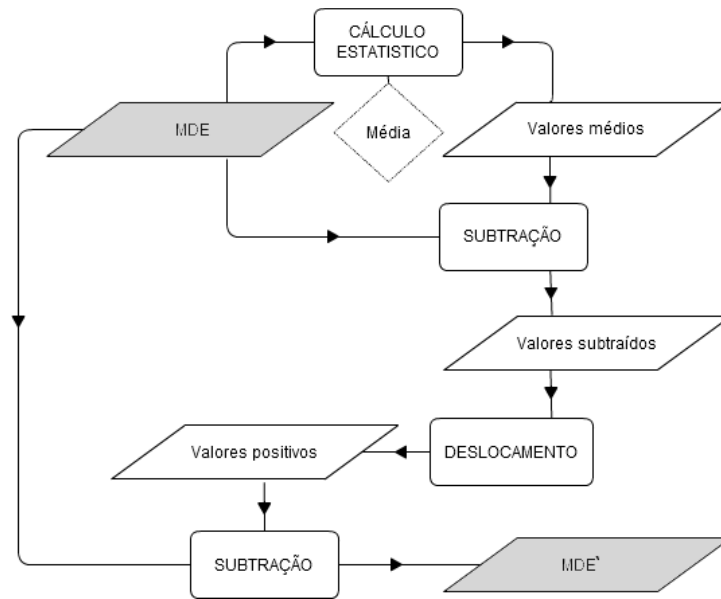


Figura 7.2 - Fluxograma ilustrando a transformação dos valores de elevação do MDE, mostrando as operações aritméticas realizadas para obtenção do MDE'.

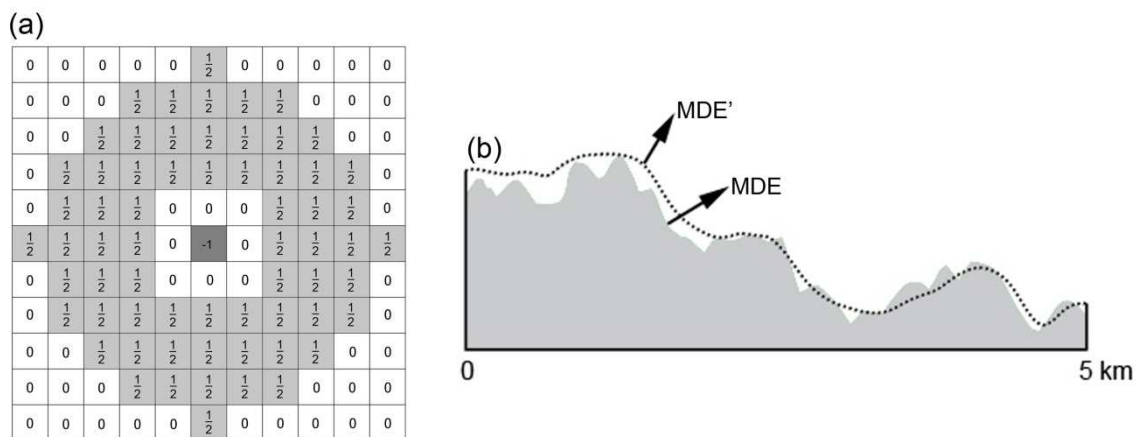


Figura 7.3 - (a) Formato da janela aplicada ao MDE para transformação dos valores de altitude obtendo-se a média de pixels que foi subtraída do valor do pixel central. (b) Esquema ilustrativo do efeito na superfície do MDE após a transformação dos valores de elevação (MDE') de forma a suavizar máximos e mínimos de menor magnitude.

Posteriormente, foram aplicados esquemas de cores para o MDE e o MDE' com objetivo de salientar áreas de interesse, como sugerido por Hayakawa et al. (2010a). Este procedimento consistiu da atribuição de diferentes cores para intervalos de valores de altitude estabelecidos pelo intérprete. A aplicação destes esquemas de cores por meio do aplicativo *Global Mapper*TM (versão 12) permitiu que novos tons de cores fossem gerados pela mistura gradual entre os valores de altitude localizados nos limites destes intervalos e as cores a estes atribuídas, realçando, ainda mais, determinadas porções de interesse nos MDE. Os MDE resultantes foram convertidos em imagens coloridas com três canais de cores, também chamadas imagens RGB, acrônimo de *Red*, *Green* e *Blue*, que correspondem às cores-luz primárias (vermelho, verde e azul). Esta conversão permitiu que a informação de cor resultante da aplicação de esquemas de cores fosse decomposta em 256 níveis de cinza em cada um dos canais, preservando as áreas realçadas por esquemas de cores no processo de classificação destas imagens realizado posteriormente.

7.2.2 Classificação das imagens de sensoriamento remoto

A classificação foi precedida por dois procedimentos de segmentação denominados A e B, que resultaram em dois níveis de objetos com nomes homônimos. Estes níveis de objetos extraídos das imagens são compostos por polígonos topologicamente relacionados, que compartilham limites de objetos localizados em níveis diferentes quando estes se encontram espacialmente superpostos.

O processo de segmentação A procurou explorar características das imagens ópticas, enquanto que o processo de segmentação B teve como objetivo extrair limites de áreas correspondentes a contrastes altitudinais interpretados como diferenças vegetacionais e/ou topográficas em áreas florestais. Em ambos os casos, as segmentações foram realizadas em nível de pixels utilizando-se o algoritmo multirresolução (BAATZ; SCHÄPE, 2000). A inspeção visual dos segmentos resultantes permitiu que os valores dos parâmetros Escala, Cor-Forma e Compacidade-Suavidade fossem ajustados para cada nível de segmentação.

A segmentação A foi feita utilizando-se as bandas espectrais ETM2, ETM3, ETM4, ETM5 e ETM7, todas com pesos iguais, e os vetores correspondentes a rede de

drenagem. Os parâmetros Escala, Forma e Compacidade foram ajustados para 20, 0,3 e 0,2, respectivamente, o que permitiu a extração de objetos pequenos e com geometria pouco compacta, priorizando-se o estabelecimento de seus limites a partir das informações espectrais das bandas. A segmentação B foi feita com base nos dados MDE' realçado por esquema de cores e transformado para imagem RGB e nos vetores correspondentes aos cursos fluviais. Valores de Escala, Forma e Compacidade de 90, 0,4 e 0,8, respectivamente, foram aplicados visando-se obter objetos relativamente maiores que na segmentação A, com menor influência dos valores dos pixels e alta compacidade geométrica.

O processo de agrupamento de objetos levou em consideração 5 classes, apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Classes utilizadas para agrupar objetos e suas definições.

CLASSE	DEFINIÇÃO
Corpos D'água	Corpos d'água estagnados, incluindo-se lagos, alargamentos de cursos fluviais e reservatórios.
Cursos Fluviais	Área de sobreposição aos cursos fluviais extraídos manualmente.
Floresta Baixa	Áreas de vegetação florestal em contraste com áreas de floresta densa e exibindo relação de continuidade com áreas de savana.
Não-Savana	Áreas de vegetação aberta, excluindo-se áreas de savana (p.e. culturas agrícolas, desmatadas, pastagens, solo exposto e formações pioneiras).
Savana	Vegetação aberta com caráter reliquiar, incluindo-se os tipos vegetacionais de Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa

Os valores herdados do PI rede de drenagem foram utilizados para agrupar objetos do nível A na classe 'Cursos Fluviais'. Objetos deste mesmo nível foram agrupados na classe 'Corpos D'Água' utilizando-se valores de um novo atributo, criado por meio de operações aritméticas entre as bandas espectrais, denominado WI. Estas operações seguiram metodologia descrita por Xu (2006), como mostra a equação abaixo:

$$WI = (ETM2 - ETM5)/(ETM2 + ETM5)$$

Objetos do nível A com alta resposta espectral, que aparecem em tons claros nas imagens ópticas, foram agrupados em classe temporária denominada ‘Objetos Claros’ através do ajuste de um limiar a partir do atributo *Mean Layer Values* para a imagem CP1. Limites internos entre objetos desta classe foram removidos utilizando-se o algoritmo *Merge Region* no aplicativo DEFINIENS, o que reduziu significativamente o número de objetos. Em seguida, 51 amostras representativas de áreas de savana e outras 74 de outros tipos de vegetação aberta foram coletadas graficamente por inspeção visual de composições coloridas de bandas espectrais Landsat-7/ETM+. Para estas amostras, diversos atributos, que descrevem propriedades espectrais, relativas a forma geométrica e relação com propriedades de objetos vizinhos, foram calculados dentro do aplicativo DEFINIENS, sendo que estes valores foram exportados para o aplicativo WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*) (HALL et al., 2009). Neste aplicativo, realizou-se a classificação das amostras coletadas utilizando-se o algoritmo C4.5 (QUINLAN, 1993), que foi reprogramado em linguagem JAVA e denominado de J48. Três subgrupos obtidos aleatoriamente a partir das amostras foram utilizados para a avaliação da classificação utilizando-se a técnica de validação cruzada com número de iterações igual a 10 (HAN; KAMBER, 2006).

Os atributos e respectivos valores obtidos por meio de árvore de decisão gerada a partir da classificação de amostras foram utilizados para descrever as classes ‘Savana’ e ‘Não-Savana’ no aplicativo DEFINIENS, cuja classificação eliminou automaticamente a classe temporária ‘Objetos Claros’. Posteriormente, áreas relativamente pequenas (< 500 km²) e próximas de cursos fluviais (< 1.200 m) interpretadas como rebrota foram removidas da classe ‘Savana’ e incluídas na classe ‘Não-Savana’.

Objetos classificados do nível A, até o presente momento, foram transferidos para o nível B utilizando-se o algoritmo *Border Optimization* no aplicativo DEFINIENS (Figura 7.4).

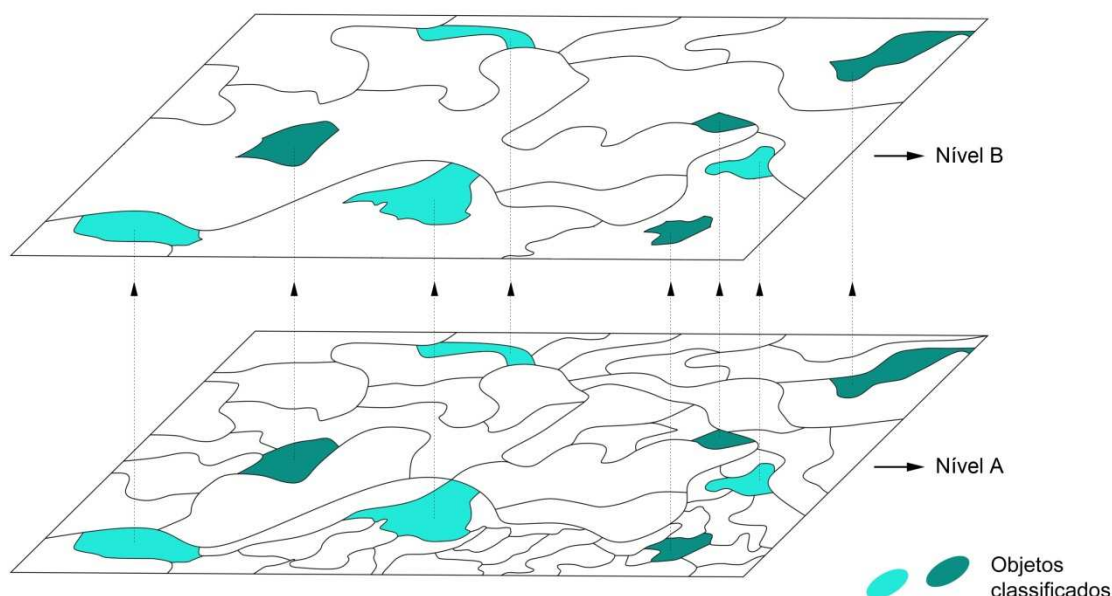


Figura 7.4 - Ilustração do processo de extração de objetos classificados do nível A para o nível B no aplicativo DEFINIENS.

Para extração de contrastes altitudinais em áreas de vegetação florestal, utilizou-se soma aritmética dos valores do atributo *Mean Layer Values* das três bandas do MDE realçado por esquema de cores em formato RGB para reproduzir tonalidades escuras correspondentes a estas áreas. Utilizaram-se, também, os valores do atributo Borda Relativa para 'Cursos Fluviais' para reproduzir o padrão encontrado para áreas de savana, as quais se localizam predominantemente em áreas de baixa densidade de drenagem. Os valores de um terceiro atributo, denominado Borda Relativa para 'Savana', foram utilizados para identificar segmentos que estão em contato físico com áreas de savana. O ajuste fino dos valores dos atributos mencionados acima permitiu encontrar áreas onde ocorrem contrastes altitudinais no MDE que se encontram em continuidade com áreas de savana, que foram agrupados na classe 'Floresta Baixa'.

A seguir, substituiu-se o atributo Borda Relativa para 'Savana' por um novo atributo denominado Borda Relativa para 'Floresta Baixa'. Novamente, o ajuste de valores para três atributos simultaneamente permitiu expandir a área ocupada pela classe 'Floresta Baixa'. Isto se deu através da criação de uma classe temporária, sendo que foi habilitada

a repetição do processo de classificação até determinada iteração na qual não ocorra mais nenhuma mudança. Ao final de cada iteração, os objetos agrupados na classe temporária mencionada acima são imputados na classe ‘Floresta Baixa’ pelo algoritmo *Assign Class*. Desta maneira, na iteração seguinte os valores do atributo Borda Relativa para ‘Floresta Baixa’ são automaticamente modificados para objetos ainda não classificados. Isto permite que, a cada iteração, mais objetos sejam agrupados na classe ‘Floresta Baixa’, expandindo sua área sobre a imagem.

Por fim, a edição manual de polígonos permitiu incluir, nas classes ‘Savana’ e ‘Floresta Baixa’, objetos omitidos pelas classificações realizadas anteriormente.

7.3 Levantamento topográfico em campo

O levantamento topográfico consistiu na determinação de coordenadas planialtimétricas em transectos localizados transversalmente a segmentos de vegetação de interesse, segundo interpretações feitas com base nos dados de sensoriamento remoto. Para isto, empregou-se a técnica de posicionamento por satélite, utilizando-se o sistema GPS e os métodos estático e *stop’n’go*, cujas especificações encontram-se na Tabela 7.2. Quando necessário, utilizou-se nivelamento geométrico empregando-se nível ótico e réguas stadimétricas.

Tabela 7.2 - Especificações dos métodos utilizados para o levantamento topográfico.

Especificações	Método Estático	Método <i>Stop and go</i>
Equipamento	Topcon Hipe L1L2	Sokkia Startus L1
Base	POVE	Bases locais
PDOP corte	6	6
Elevação de antena	15	15
Tempo de permanência	F (distância da base)	2 minutos
Taxa de gravação	15 seg	2 seg
Número mínimo de satélites	5	5
Distancia máxima entre base local e ponto de interesse	300 km	15 km

Para o método estático, foram utilizados dois receptores, um fixo em local de coordenadas conhecidas (base), e outro sobre o ponto que se desejava obter as coordenadas (móvel). A base de referência utilizada foi a a estação RBMC de Porto Velho (Identificação / Código internacional: POVE / 93780), distante aproximadamente 250 km dos principais pontos de interesse, e 5 pontos foram escolhidos como base local (Figura 7.5), sendo que para transferência de coordenadas utilizou-se um receptor Topcon Hipe de dupla frequência (L1/L2).

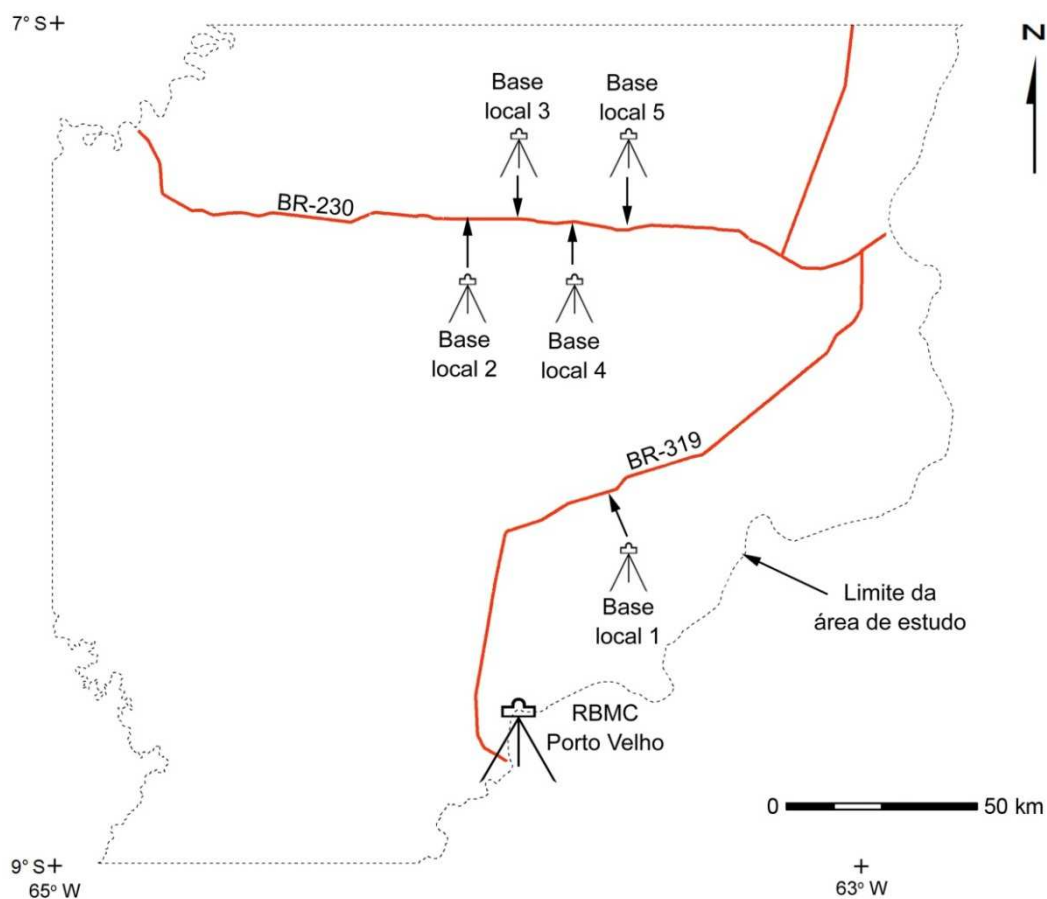


Figura 7.5 - Localização das bases de coordenadas utilizadas para levantamento topográfico na área de estudo.

No método *stop-and-go*, foi empregado um par de receptores GPS Sokkia Stratus de frequência única (L1). O distanciamento entre os pontos foi irregular, sendo que esta distância variou em função de visada de céu satisfatória e interferência de feições antrópicas e obstáculos. O monitoramento da observação e a navegação até os locais (pontos) de interesse foram realizados por meio de um receptor GPS Garmin 60CS.

O processamento dos dados obtidos em campo foi realizado utilizando-se os aplicativos Sokkia Spectrum Survey™ (versão 4.20), Topcon Tools™ (versão 7.2) e MAPGEO2010™ (versão 1.0). As altitudes elipsoidais (h) resultantes do levantamento realizado foram convertidas em altitudes ortométricas (H), referidas ao geóide ou nível médio do mar. Esta conversão foi realizada para cada ponto através da seguinte equação:

$$H = h - N$$

Onde N é a altura ou ondulação geoidal. A precisão final obtida para os valores de altitude foi da ordem de 0,5 m para mais ou menos.

7.4 Caracterização de segmentos de vegetação

A caracterização de segmentos de vegetação de interesse baseou-se na análise da distribuição espacial destas feições a partir da interpretação visual de dados de sensoriamento remoto e do mapa de segmentos obtido anteriormente no processo de classificação. Foram também analisadas propriedades geométricas dos principais segmentos de vegetação com base nos valores de atributos calculados dentro do aplicativo DEFINIENS. Estes incluem: Comprimento máximo, Largura máxima, Área total, Comprimento médio de ramificações, Razão entre comprimento e largura, Índice de borda, Assimetria e Densidade. Maiores informações sobre como estes atributos são calculados para os segmentos podem ser encontrados em Definiens (2007).

Adicionalmente, analisou-se o relacionamento entre os segmentos de vegetação obtidos e outras informações disponíveis para este estudo, como a rede de drenagem e os perfis altimétricos obtidos a partir de dados coletados em campo.

8. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Estes encontram-se subdivididos em tópicos organizados em função da metodologia proposta.

8.1 Processamento dos dados de sensoriamento remoto

O processamento de dados de sensoriamento remoto objetivou identificar diferenciações de vegetação e altitudinais que pudessem ser utilizadas na extração e caracterização de segmentos de vegetação de interesse. O grau de detecção dessas feições variou em função do produto de sensoriamento remoto ou processamento utilizado. Assim, imagens Landsat-7/ETM+ (Figura 8.1) serviram para revelar cinturões isolados de vegetação aberta, na maioria estreitos e alongados, que correspondem a áreas de savana em mapas de vegetação (p.e. RADAMBRASIL, 1978). Estas são facilmente distinguidas de áreas florestais do entorno, bem como de corpos d'água estagnados e cursos fluviais. Além disto, áreas antropizadas (i.e., desmatamento, cultura agrícola ou pastagem) identificadas em campo e/ou visualmente nas imagens, de tonalidade similar à cobertura vegetal aberta, puderam ser individualizadas visualmente pela geometria (bordas angulares), sob forma de quadrados e retângulos regulares concentrados prioritariamente nas proximidades de alinhamentos correspondentes a rodovias. Subordinadamente pode-se detectar pequenas áreas relacionadas a formações pioneiras em associação às áreas de savana, que ocorrem nas proximidades de cursos fluviais principais, como também previamente observadas nos mapas de vegetação disponíveis.

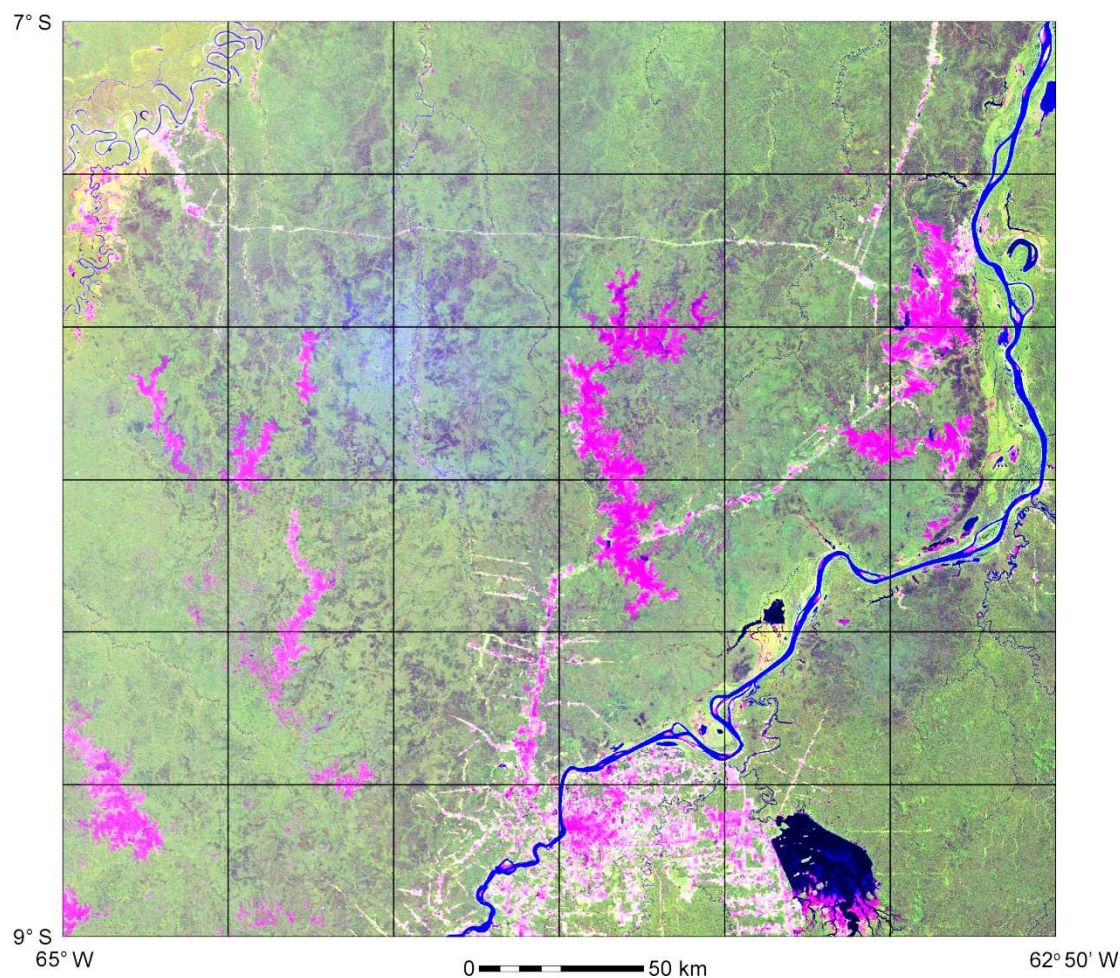


Figura 8.1 - Mosaico de imagens Landsat7-ETM+ da área de estudo, adquiridas entre agosto de 2000 e agosto de 2001, em composição R5-G4-B3. Notar que grande parte das áreas de savana ocorre formando cinturões estreitos e alongados. (Tons magenta = áreas de savana e antropizadas; Tons esverdeados = áreas florestais; Tons azulados = corpos d'água e cursos fluviais; Tons amarelados e verde-claros = áreas de formações pioneiras.

A transformação das imagens ópticas por componentes principais diminuiu a variância das imagens multiespectrais Landsat-7/ETM+, concentrando a informação de maior interesse correspondente a áreas de vegetação aberta na primeira componente (CP1), permitindo melhor realçar estas áreas relativamente às composições coloridas (Figura 8.2).

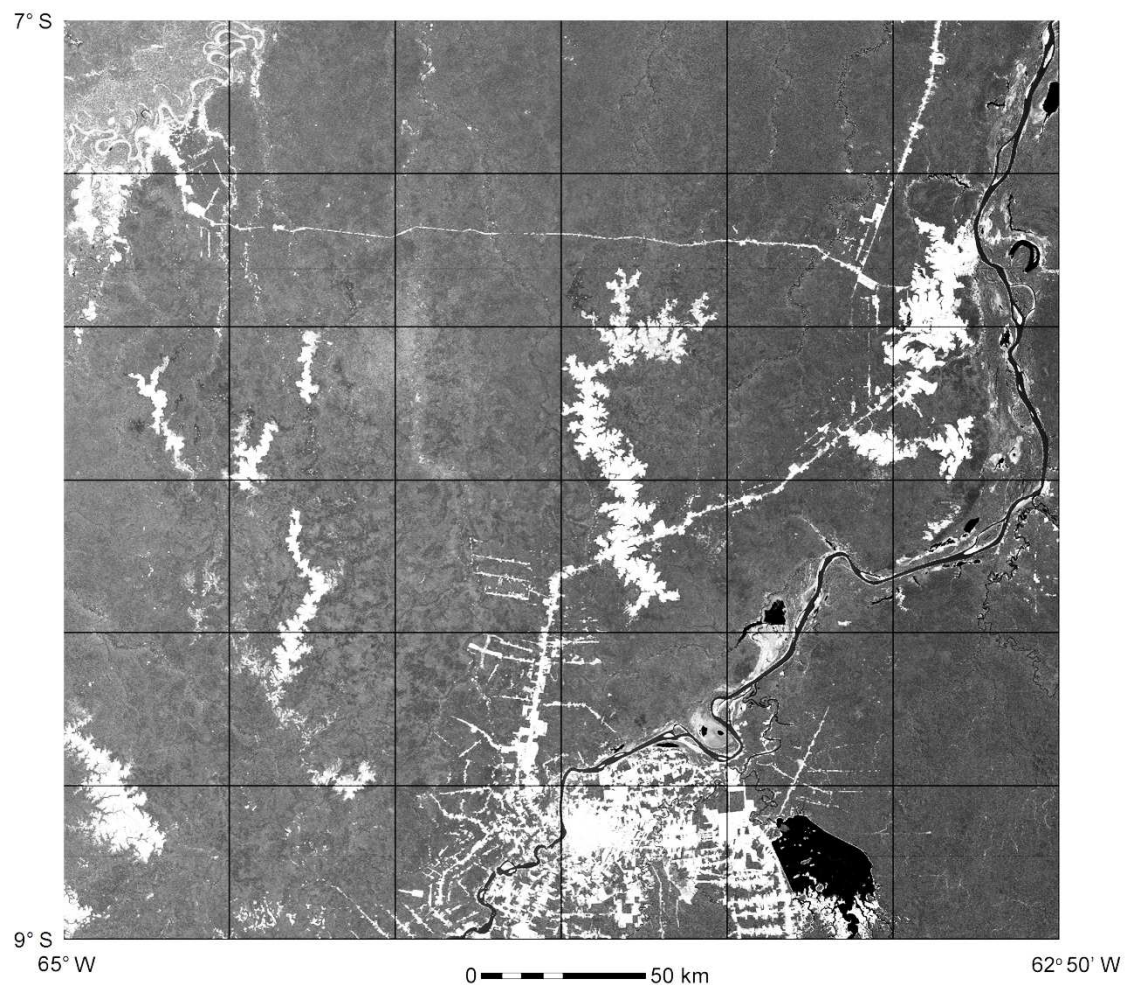


Figura 8.2 - Imagem resultante da análise de componentes principais (CP1). Áreas de vegetação aberta aparecem em tons claros e são mais bem evidenciadas neste produto do que em composições coloridas (comparar com Figura 8.1).

Assim como nos produtos anteriores, o processamento do MDE foi eficiente para revelar os cinturões de savana, graças a suas altitudes inferiores em até cerca de 20 m em relação às áreas florestais do entorno (Figuras 8.3 e 8.5-I). Além disto, este produto foi sensível à detecção de feições que passaram totalmente despercebidas ou foram de difícil distinção nas imagens ópticas. Isto foi conseguido com a simples aplicação de

paletas em níveis de cinza, devidamente criadas para salientar diferenças altimétricas mais sutis do que aquelas produzidas entre as áreas de savana e de floresta.

O MDE evidenciou, com grande destaque, diferentes terraços correspondentes a depósitos aluvionares distribuídos ao longo dos rios principais, ou seja, rios Purus e Madeira, onde os terraços ocorrem em áreas deprimidas em até cerca de 40 m relativamente ao entorno (Figura 8.5-III). Além disto, este produto foi importante para salientar inúmeros segmentos alongados em meio à formação florestal. Estes aparecem como altitudes ligeiramente inferiores, portanto em tons de cinza mais escuro que o entorno. É importante notar que estes segmentos estão em continuidade lateral perfeita com os cinturões de savana, formando uma série de ramificações arranjadas em padrão dendrítico, que se tornam cada vez mais estreitas e tênues na paisagem (Figuras 8.4-a e 8.4-b). É importante notar que, nas imagens ópticas, áreas de floresta baixa possuem contrastes espectrais cada vez menores à medida que se afastam de áreas de savana, porém, fragmentos menores de savana ainda podem ser encontrados nas áreas mais distantes (Figuras 8.4-I, 8.4-II e 8.4-III). Transectos obtidos ao longo dessas áreas confirmam altitudes inferiores relativamente aos seus entornos, com gradientes de até cerca de 10 m (Figura 8.5-II), ou seja, relativamente inferiores às obtidas quando comparadas às áreas de savana.

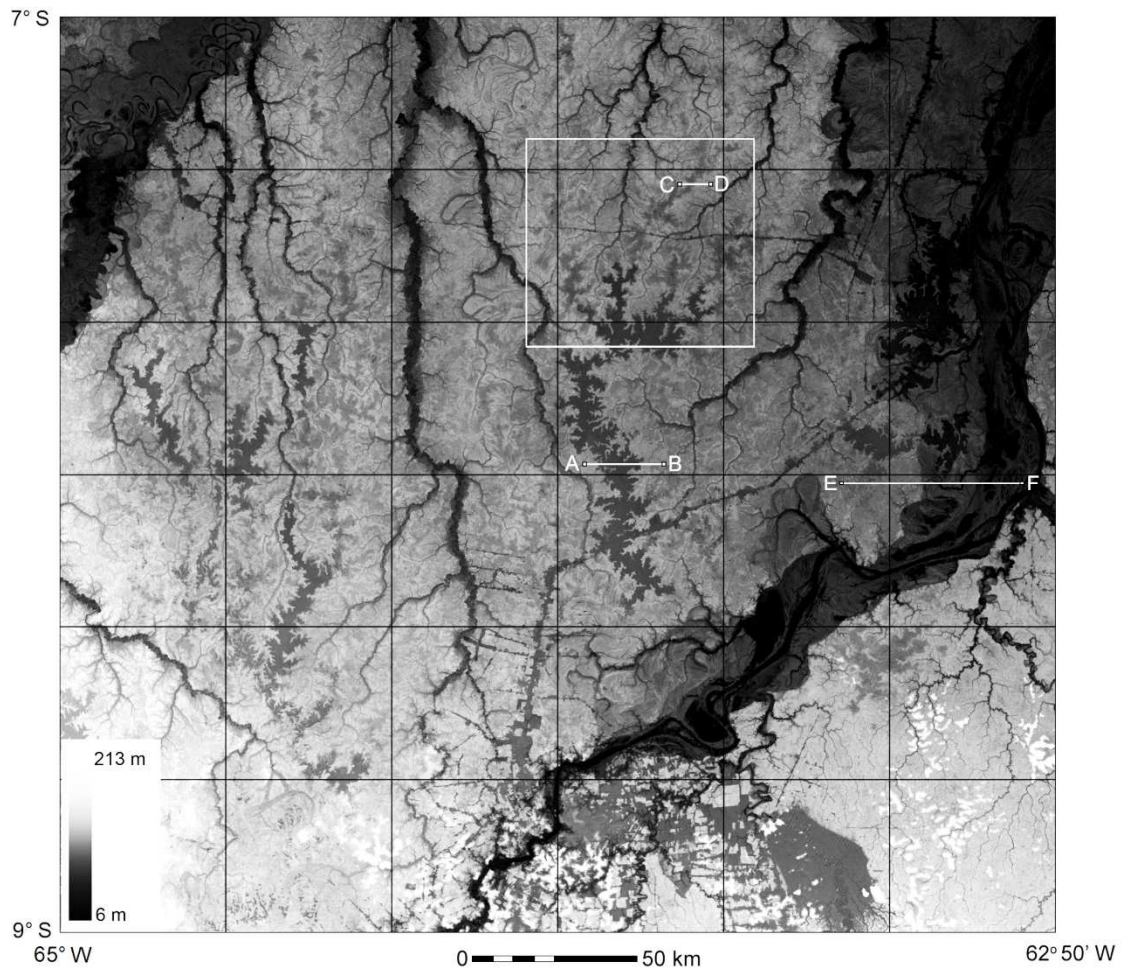


Figura 8.3 - Imagem em níveis de cinza obtida a partir do MDE (aumento altimétrico em direção a tons progressivamente mais claros). Notar que, neste produto, as áreas de savana apresentam tons de cinza similares às áreas antropizadas, aos corpos de água e às margens fluviais. O quadro interno na cor branca localiza a Figura 8.4 e as linhas brancas localizam os transectos A-B, C-D e E-F apresentados na Figura 8.5.

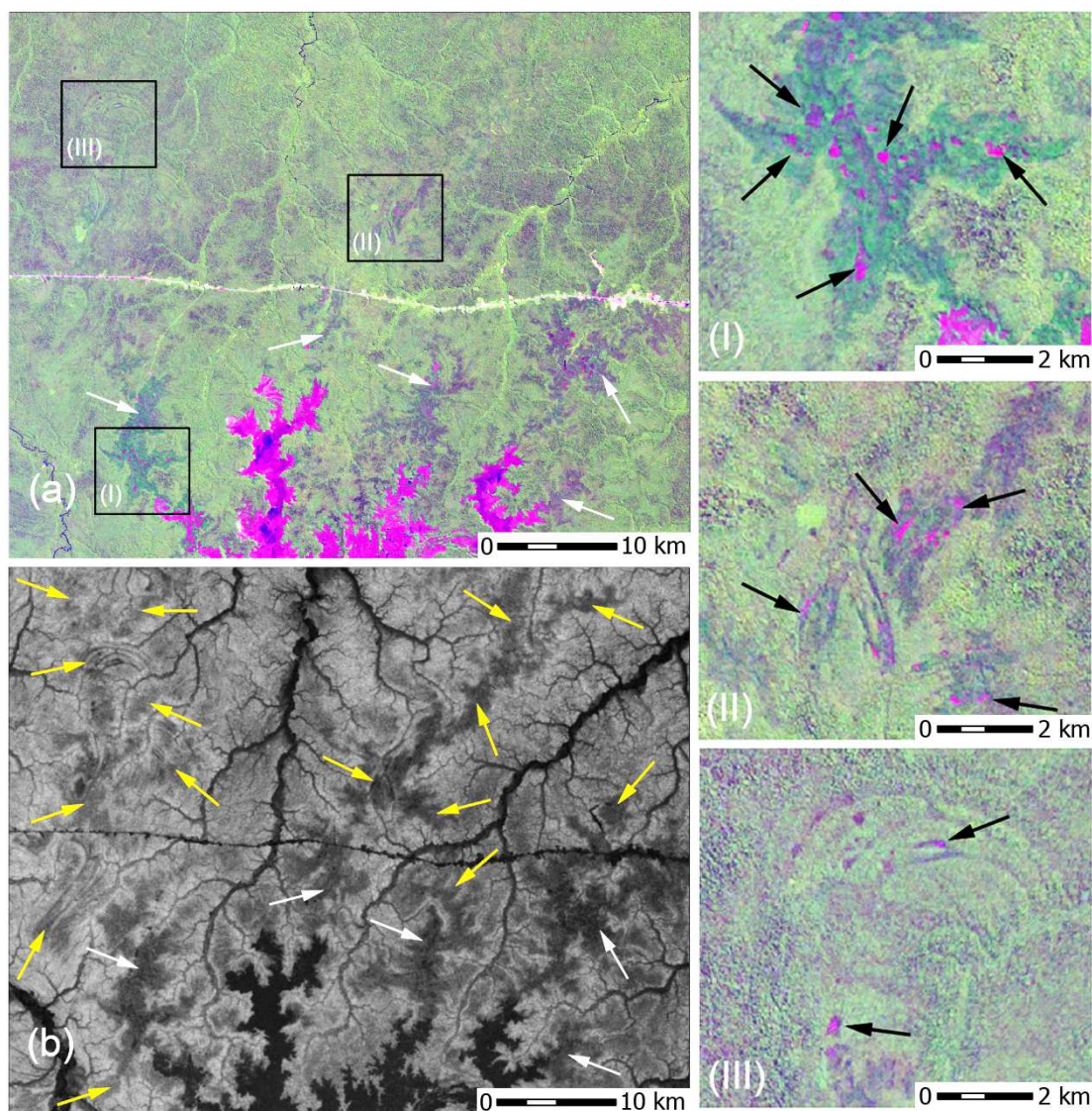


Figura 8.4 - Comparação entre composição colorida Landsat-7/ETM+ (R5-G4-B3) (a) e MDE em tons de cinza (b) para mesma área (ver localização na Figura 8.3). Notar que alguns contrastes de tons cinza-médio em áreas florestais revelados no MDE tem correspondência com diferenças sutis de cores na imagem óptica (setas brancas), enquanto outros são revelados apenas no MDE (setas amarelas). À medida que áreas de floresta baixa se afastam das manchas maiores de savana, tornam-se menos visíveis nas imagens ópticas, porém, é possível detectar pequenos fragmentos de vegetação de savana em meio a vegetação florestal, que também se tornam mais escassos com o distanciamento (setas pretas em I-III).

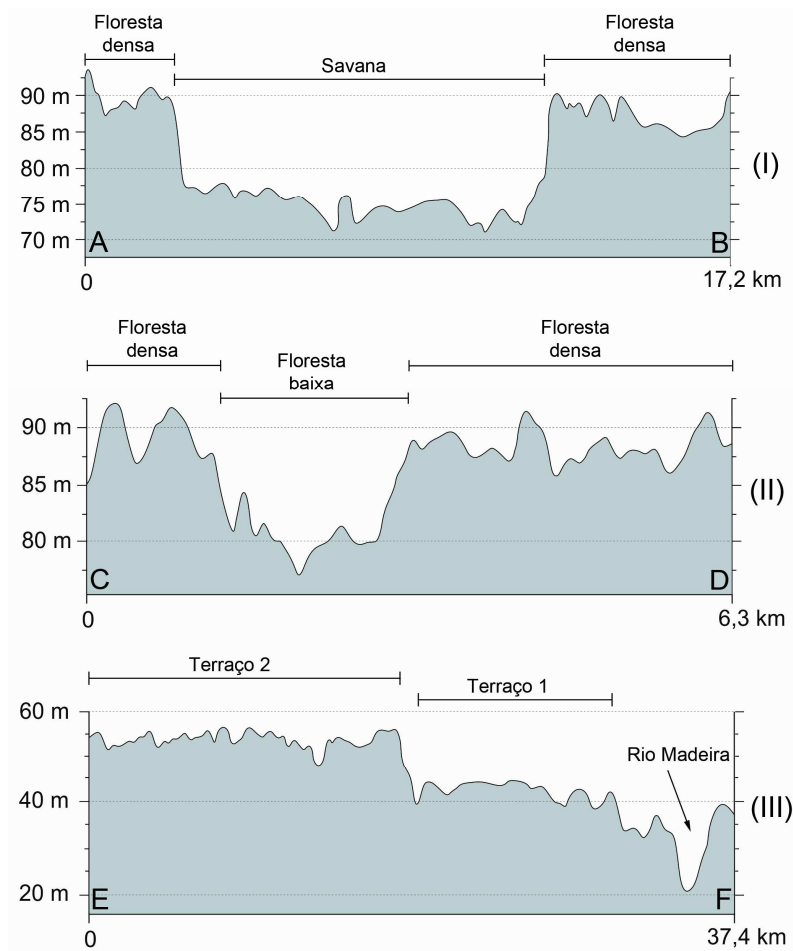


Figura 8.5 - Transectos com contrastes altitudinais (I-III) derivados de dados MDE (ver localização na Figura 8.3). Notar no transecto A-B (I), obtido sobre área de savana em contraste brusco com floresta densa, diferenças altimétricas abruptas da ordem de 20 m nos limites entre as áreas. Notar, também, no transecto C-D (II) variação altimétrica evidente, da ordem de 10 m, entre área de floresta baixa e de floresta densa. O transecto E-F (III) mostra níveis de terraços e diferença altimétrica de até cerca de 40 m em relação à calha do rio Madeira.

Os resultados promissores revelados pela aplicação de paletas de tons de cinza no MDE levaram à intensificação do processamento deste produto, a fim de amplificar a detecção de feições com possível significado geomorfológico. A transformação desses dados aplicando-se esquemas de cores permitiu realçar, ainda mais, as áreas de savana e de

floresta baixa (Figura 8.6). Depósitos aluvionares foram também melhor ressaltados, bem como as drenagens fluviais atuais.

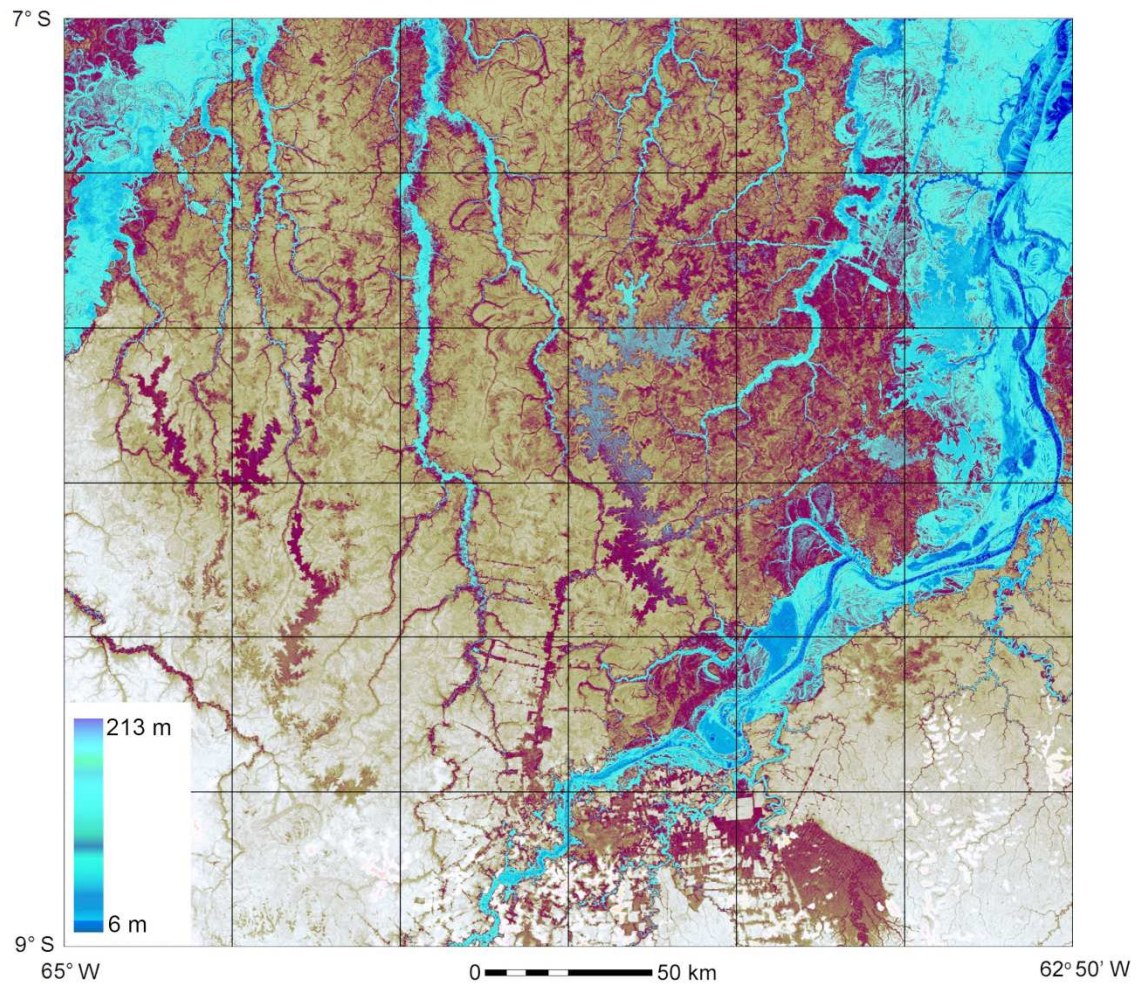


Figura 8.6 - MDE realçado por esquema de cores. Notar realce das áreas de savana e de suas continuidades nas áreas florestais, bem como da melhor separação entre estas áreas e áreas rebaixadas correspondentes a depósitos aluvionares dos rios principais.

A transformação dos valores de elevação do MDE permitiu eliminar diferenciações topográficas de menor magnitude impingindo certo grau de generalização aos dados do MDE. O resultado prático deste procedimento se traduziu na suavização de altos e

baixos de menor magnitude na representação do relevo, possibilitando a aplicação de esquema de cores que realçou bordas das feições correspondentes às áreas de savana e às áreas de floresta baixa em meio à floresta densa (Figuras 8.7 e 8.8). Este produto possibilitou, também, melhor visualização de detalhes morfológicos associados com os depósitos aluvionares que ocorrem ao longo dos rios Madeira e Purus.

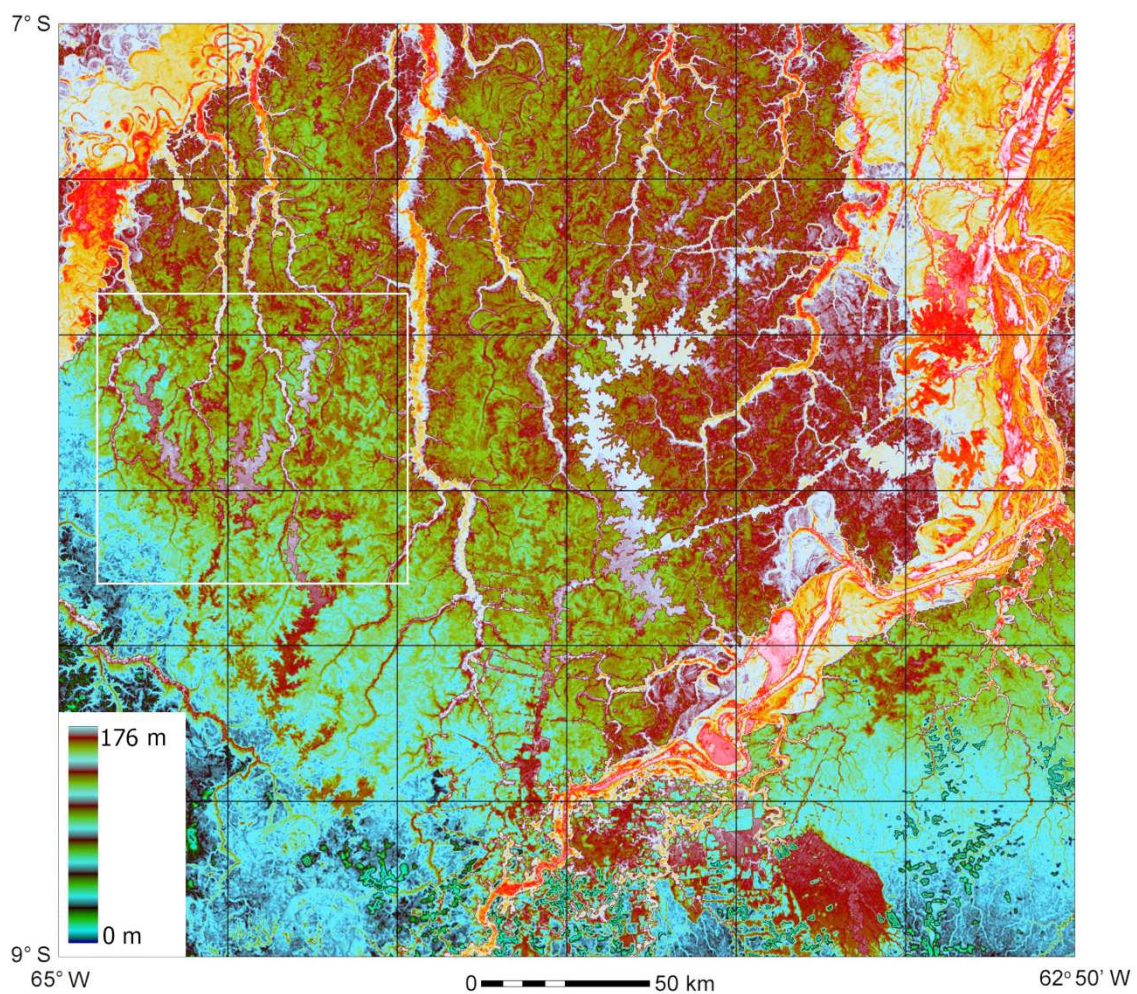


Figura 8.7 - MDE' após aplicação de esquema de cores. Notar realce significativo das áreas de savana e de suas continuidades nas áreas florestais. Observar, também, o melhor detalhe das morfologias associadas com os depósitos aluvionares dos rios principais. O quadro interno localiza a Figura 8.8.

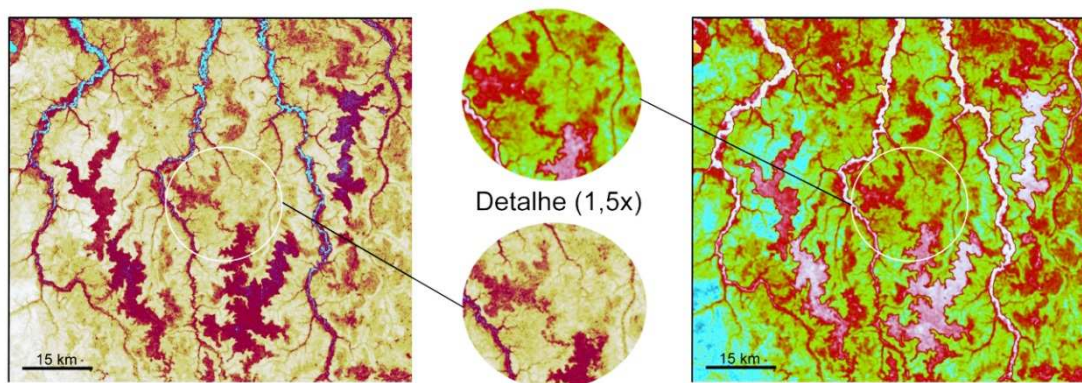


Figura 8.8 - Comparação dos produtos MDE (esquerda) e MDE' (direita) com diferentes esquemas de cores. Notar que as bordas das feições salientadas em tons de marrom no MDE foram melhor realçadas no MDE' (localização na Figura 8.7).

8.2 Extração de segmentos de vegetação

A segmentação feita com base nas imagens ópticas (segmentação A) permitiu extração de áreas de savana, que foram facilmente detectadas neste tipo de produto utilizando-se composições coloridas e imagem derivada da aplicação de componentes principais. Os valores utilizados para Escala permitiram detectar fragmentos menores de vegetação aberta (Figura 8.9-a). O ajuste do parâmetro Cor-Forma possibilitou priorizar os limites entre segmentos em função de características espectrais, facilitando não só a detecção de áreas de savana, mas também a detecção, de forma exclusiva, de outras áreas com características espectrais semelhantes, como aquelas com formações pioneiras que ocorrem nas proximidades de cursos fluviais. Estes valores, combinados com valores baixos para Compacidade-Suavidade, possibilitaram preservar bordas relativamente suaves para fragmentos maiores de vegetação aberta e de corpos d' água, bem como bordas mais retangulares de áreas antropizadas (Figura 8.9-b). A partir dos objetos obtidos pela segmentação A, foram extraídos, inicialmente, os objetos correspondentes às classes 'Cursos Fluviais' e 'Corpos D'água' (Figura 8.10).

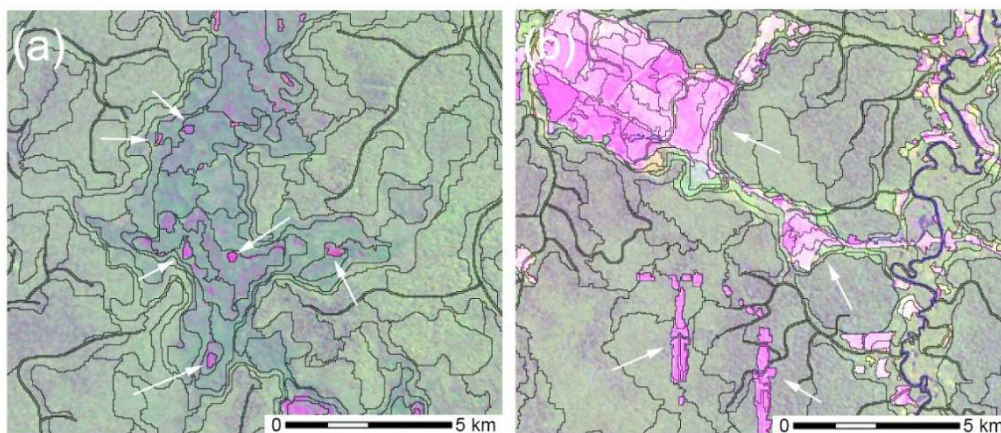


Figura 8.9 - Exemplos de resultados da segmentação A, feita com base em imagens ópticas para: (a) fragmentos menores de vegetação aberta (setas); (b) áreas desmatadas e/ou antropizadas (setas). (Linhas = limites entre objetos).

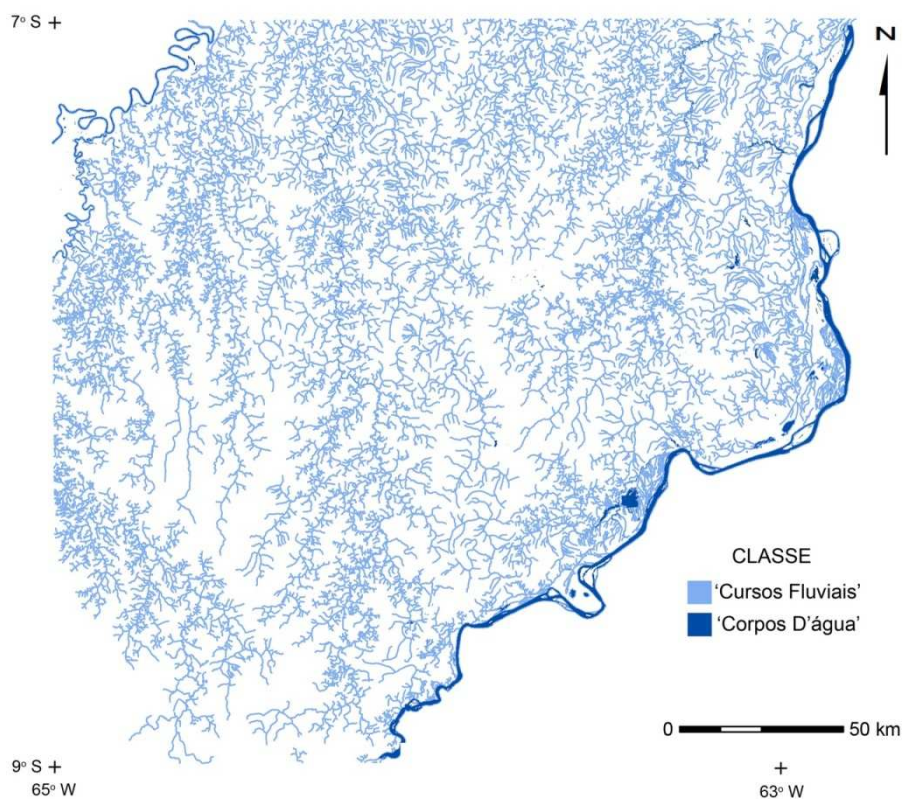


Figura 8.10 - Resultados da classificação 'Corpos D'água' e 'Cursos Fluviais' (ver descrição das classes na Tabela 7.1).

A primeira componente principal mostrou-se relativamente mais eficiente que os demais produtos para o agrupamento de áreas de vegetação aberta. Isto se deve ao maior contraste destas áreas neste produto, que facilita a obtenção de valores ou limiares aplicáveis à descrição da classe temporária ‘Objetos Claros’.

A eliminação dos limites internos entre objetos e a análise das propriedades dos objetos fusionados para a classe temporária ‘Objetos Claros’ permitiu que os tipos de cobertura predominantes melhor refletissem suas características espectrais em detrimento de fragmentos menores. Por exemplo, a fusão de pequenas áreas de culturas agrícolas ou de desmatamento resultou na melhor caracterização de manchas de savana (Figura 8.11).

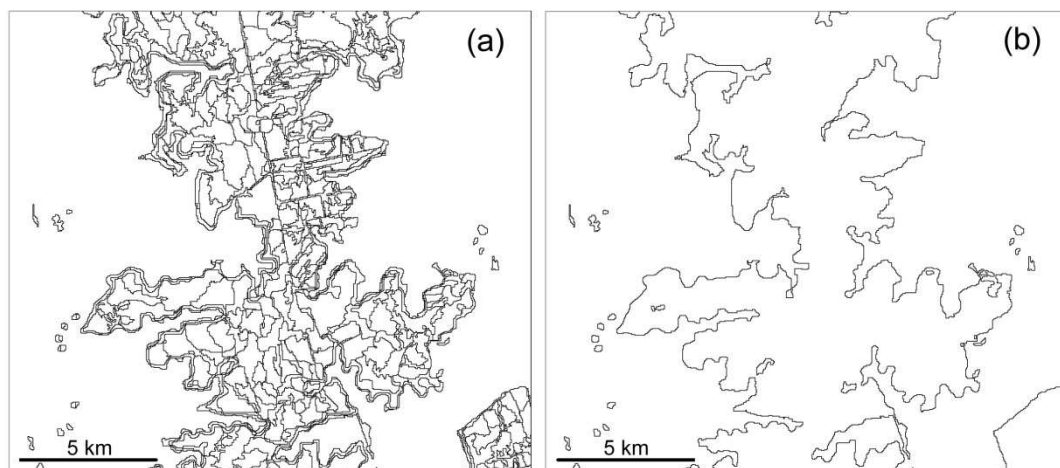


Figura 8.11 - Exemplos de limites entre objetos da classe temporária ‘Objetos Claros’ antes (a) e depois (b) da fusão entre segmentos em uma mesma área. (Linhas = limites entre objetos).

A seleção de amostras para as classes ‘Savana’ e ‘Não-Savana’ e a classificação destas amostras no aplicativo WEKA facilitaram a extração de informações e possibilitaram a identificação de atributos e limiares pertinentes para a descrição das classes. Os

resultados da avaliação da classificação de amostras (Tabela 8.1) sugerem boa concordância, como indicado pelo valor de Kappa 0,9179. A exatidão da classificação foi considerada satisfatória, sendo que apenas cinco amostras (4%) foram classificadas incorretamente. Dentre estas, quatro correspondem à classe ‘Não-Savana’ erradamente classificadas como ‘Savana’.

Os atributos e valores obtidos pela classificação de amostras das classes ‘Savana’ e ‘Não-Savana’ podem ser melhor visualizados em árvore de decisão gerada pelo aplicativo WEKA (Figura 8.12). Para a extração de áreas de savana, notou-se que atributo contextual ou de vizinhança (i.e. Borda Relativa para ‘Cursos Fluviais’) foi de grande importância para complementar o atributo espectral Média da Borda Interna para ETM4 na extração de áreas de savana. Este atributo de vizinhança, portanto, sobressaiu-se em relação a outros atributos espectrais ou relativos à forma geométrica dos objetos correspondentes a áreas de vegetação aberta.

Tabela 8.1 - Resultados da avaliação da classificação de amostras.

Classificação de amostras (C4.5)			
Número total de amostras	125		
Número total de atributos	168		
Avaliação (Percentage split)			
Amostras classificadas corretamente	120	96%	
Amostras classificadas incorretamente	5	4%	
Estatística Kappa	0.918		
Matriz de confusão			
a	b	←	Classificado como
70	4		a = Não-Savana
1	50		b = Savana

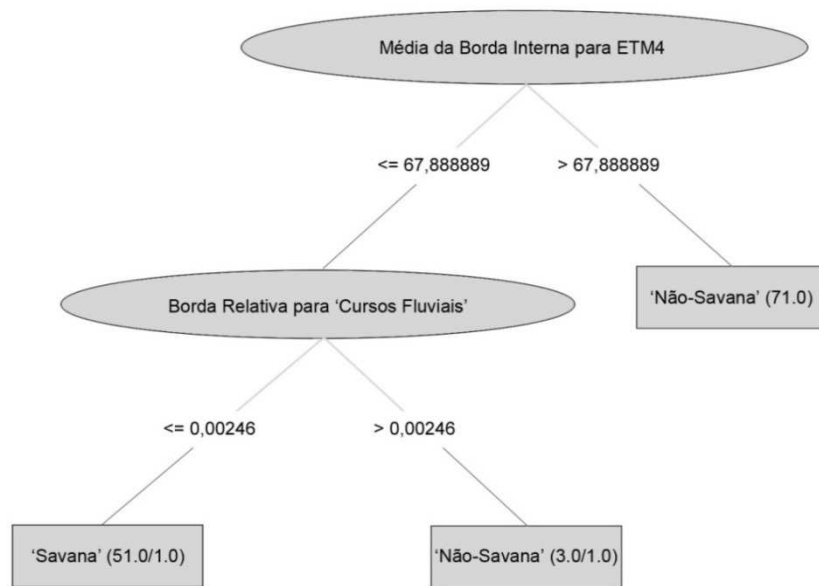


Figura 8.12 - Árvore de decisão gerada pelo aplicativo WEKA, mostrando atributos (elipses) e valores utilizados para classificação de amostras.

Após a utilização dos atributos e valores obtidos para descrever e classificar as classes ‘Savana’ e ‘Não-Savana’ nas imagens, foi realizada inspeção visual dos resultados. Esta inspeção revelou erros de inclusão na classe ‘Savana’, como sugere o modelo criado a partir das amostras. A análise mais detalhada destes erros revelou que os objetos classificados incorretamente consistem em objetos relativamente menores e localizados nas proximidades de cursos fluviais. Estas características foram utilizadas para refinar os resultados da classificação (ver Item 7.2.2). O resultado final da extração de áreas de savana é apresentado na Figura 8.13.

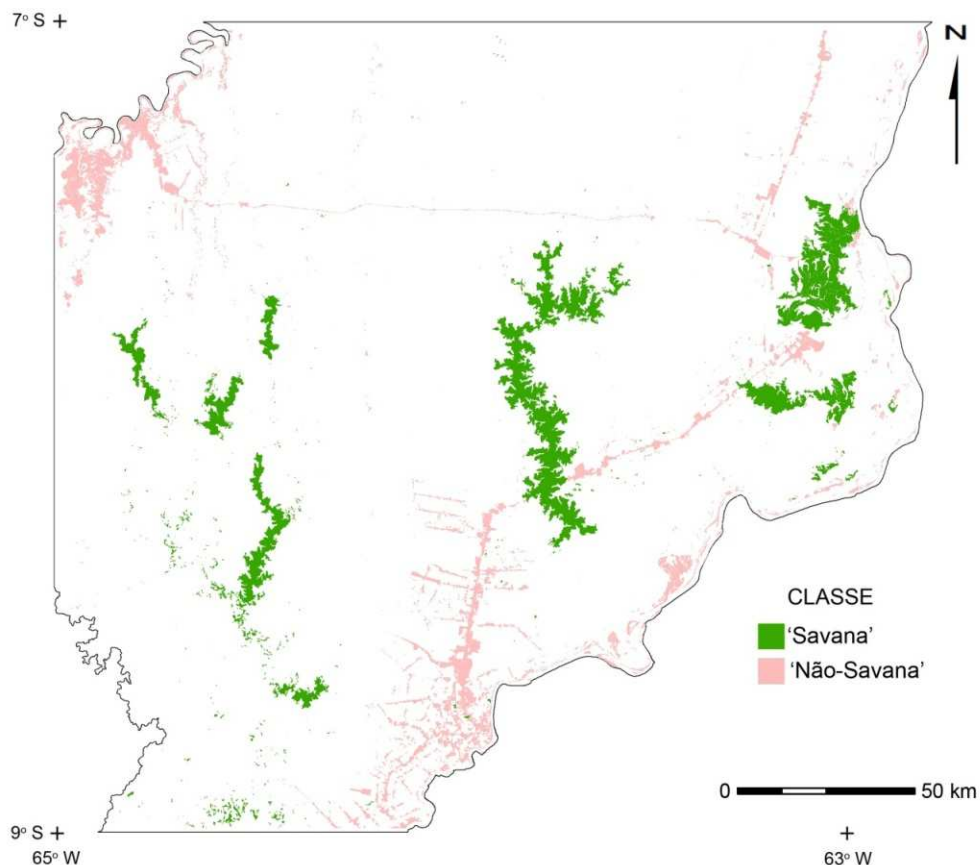


Figura 8.13 - Resultado final da separação de segmentos da classe ‘Objetos Claros’ em ‘Savana’ e ‘Não-Savana’ (ver descrição das classes na Tabela 7.1).

A segmentação utilizando o MDE’ em formato RGB (segmentação B) facilitou a obtenção de objetos com limites bem definidos, permitindo delinear a continuidade das feições relacionadas com segmentos de vegetação de interesse em áreas de floresta (Figura 8.14). Em especial, foi possível criar objetos correspondentes aos segmentos de vegetação florestal que foram identificados previamente no MDE. O ajuste do parâmetro Escala permitiu criar objetos com área relativamente maior do que os objetos criados pela segmentação A, visto que segmentos de vegetação florestal são relativamente mais contínuos e com ausência de fragmentos muito pequenos, como no caso de vegetação aberta.

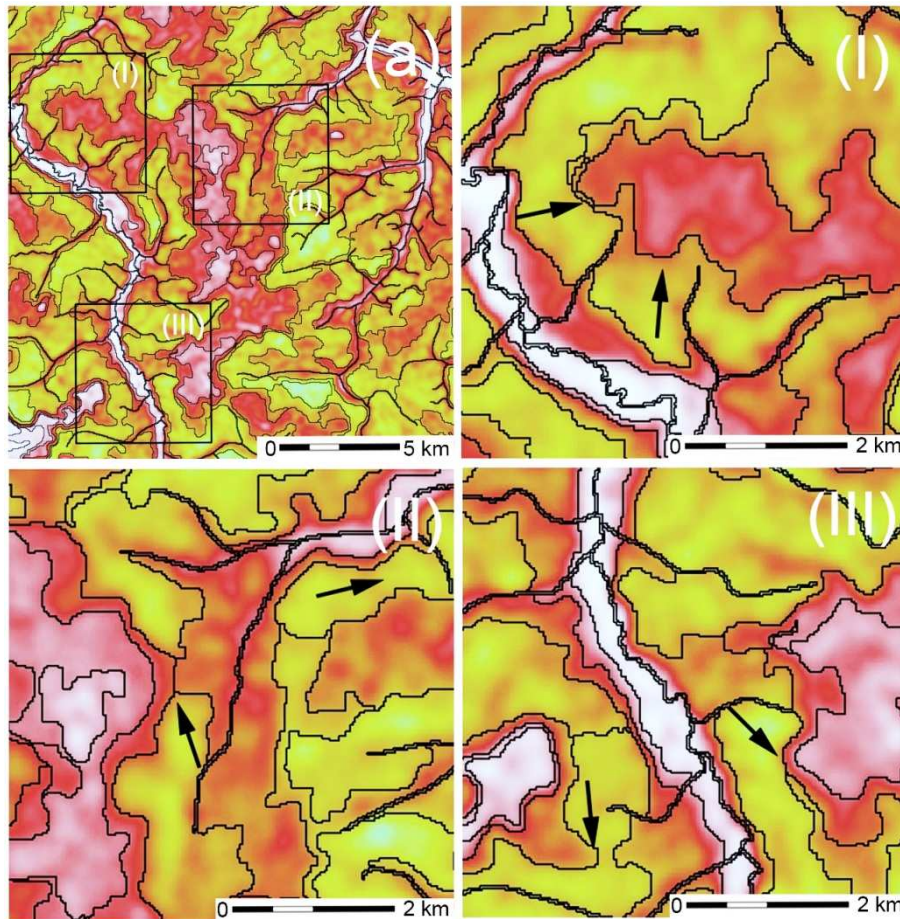


Figura 8.14 - Exemplo do resultado da segmentação B, aplicada ao MDE', mostrando o dado original e limites entre objetos (a). Notar que o realce de bordas proporcionado por este produto, conjuntamente com valores altos de Compacidade utilizados nesta segmentação, permitiram extrair corpos isolados de vegetação florestal sem que estes se fundissem a depósitos aluvionares (setas pretas em I-III). (Linhas = limites entre objetos).

A análise de padrões de ocorrência de segmentos de interesse em áreas florestais possibilitou a escolha de atributos e limiares para descrição da classe 'Floresta baixa'. A extração desta classe permitiu expandir significativamente a visualização das feições de interesse, inicialmente sugeridas pelas áreas de savana, para dentro das áreas florestais (Figura 8.15).

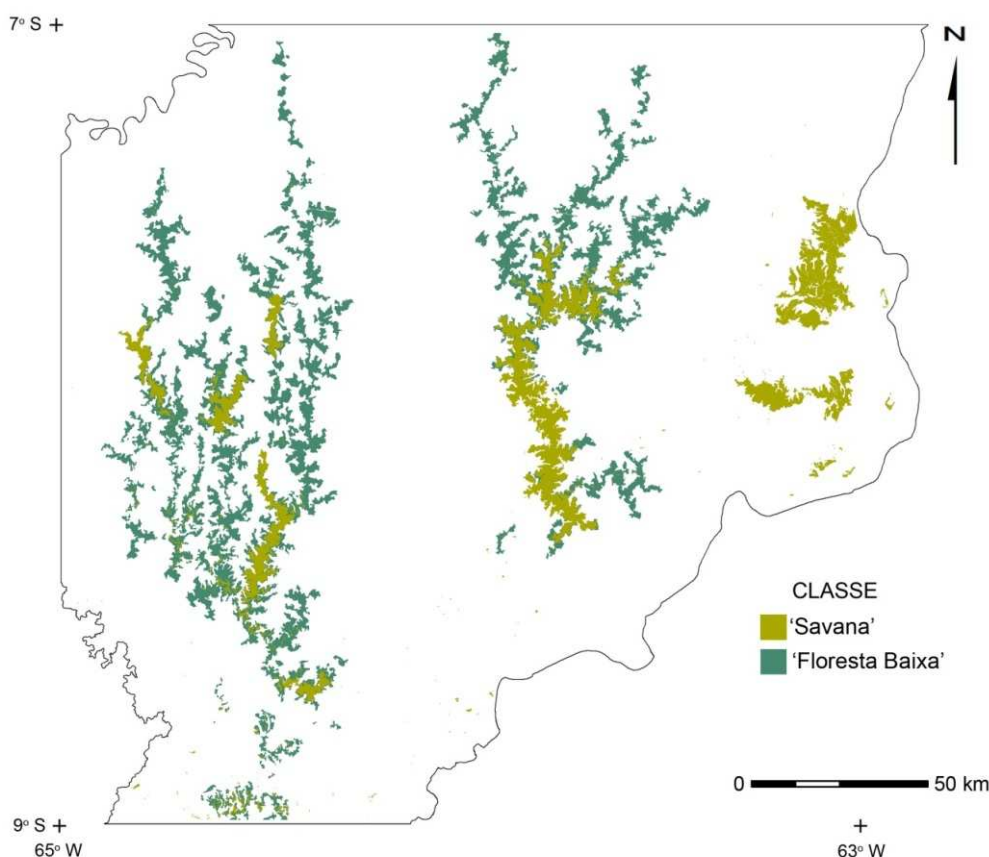


Figura 8.15 - Resultado da classificação da classe 'Floresta Baixa', mostrando também objetos classificados como 'Savana' (ver descrição das classes na Tabela 7.1).

A edição final de objetos possibilitou corrigir erros de omissão durante os procedimentos de classificação realizados anteriormente. Enquanto pequenas áreas não classificadas de forma automática puderam ser incluídas com um simples procedimento de classificação (Figura 8.16-b1), outros segmentos foram incorporados por edição manual. Dentre estes, destacam-se segmentos florestais classificados como áreas antropizadas ou omitidos da classe 'Floresta Baixa, mas que possuem relação de continuidade com vegetação de savana (Figuras 8.16-b2 e 8.16-b3).

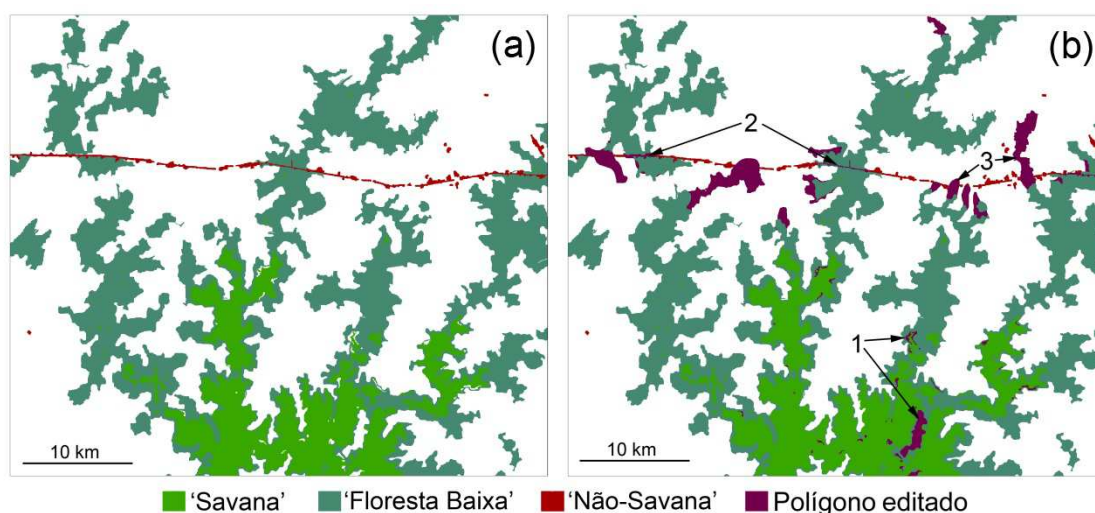


Figura 8.16 - Exemplo de resultados da classificação (a) e edição final de polígonos (b). (b1 = adição de objetos localizados inteiramente dentro de áreas de savana e de floresta baixa; b2 = adição de objetos classificados como área antropizada que correspondem a trechos de vegetação aberta e/ou solo exposto; b3 = adição de segmentos não classificados que sugerem relação de continuidade com áreas de floresta baixa) (ver descrição das classes na Tabela 7.1).

Os resultados da análise dos segmentos de vegetação, referentes ao número total de objetos, à área individual, à área média e ao perímetro médio para as classes 'Savana' e 'Floresta Baixa', são apresentados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 - Número de segmentos e área ocupada pelas classes na área de estudo.

	Total	Savana	Floresta Baixa	Unidade
Número de segmentos	838	619	219	---
Área	4399.33	1508.23	2891.1	km ²
Porcentagem da área de estudo	10.86	3.72	7.14	%
Área média dos segmentos	---	2.44	13.59	km ²

Notou-se que o número total de segmentos para a classe ‘Savana’ é bastante superior ao da classe ‘Floresta Baixa’. Entretanto, a área ocupada pela classe ‘Savana’ é relativamente inferior, sendo menos de 4% da área de estudo, enquanto que a classe ‘Floresta Baixa’ ocupa mais de 7%. Este resultado é complementado pelos valores médios da área ocupada por cada segmento, mostrando que segmentos da classe ‘Floresta Baixa’ possuem tamanho médio aproximadamente 500% maior em relação aos da classe ‘Savana’. Os segmentos da classe ‘Savana’, portanto, tendem a apresentar fragmentação relativamente maior.

8.3 Caracterização dos segmentos de vegetação

A análise visual da distribuição dos segmentos de vegetação para a área de estudo revelou sua organização de acordo com três grupos principais, orientados na direção geral N-S (Figura 8.17). O maior desses grupos (localizado a oeste) distribui-se continuamente por mais de 150 km, sendo o menor deles (a leste) de pouco mais de 50 km de extensão. Apesar de estes grupos serem separados por distância de até cerca de 100 km, é interessante observar que suas terminações (limite sul) formam um alinhamento NE-SW que é notavelmente paralelo à direção geral do curso do rio Madeira neste local.

A contabilização do número e área dos segmentos individuais, bem como da área média dos segmentos em conjunto para cada grupo, é apresentada na Tabela 8.3. Os valores de número e área dos segmentos diminuem de oeste para leste. Por outro lado, os valores de área média dos segmentos revelam que nas partes oeste e leste, correspondentes aos grupos 1 e 3, ocorre maior concentração de manchas com área relativamente menor.

Três segmentos com maiores valores de área (Figura 8.18) foram selecionados para análises de atributos de forma (Tabela 8.3). Estes segmentos foram selecionados por melhor refletirem as características geométricas.

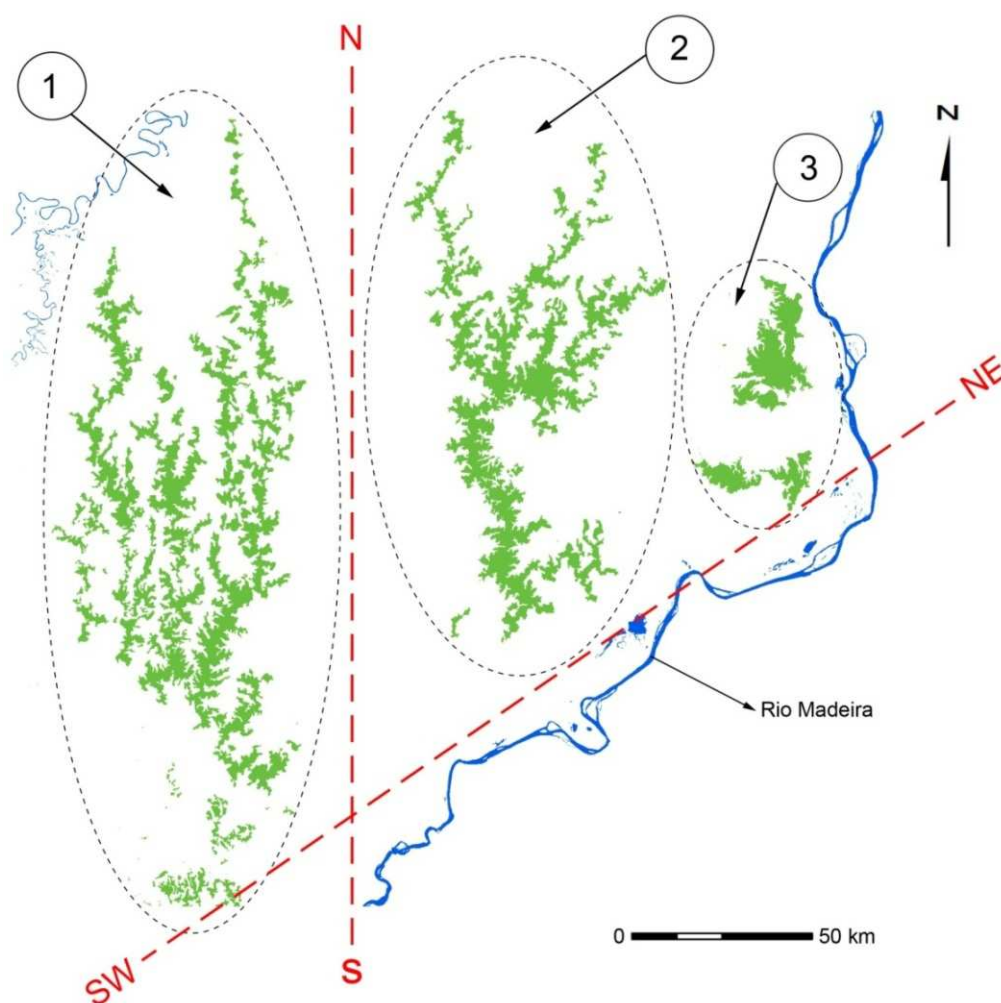


Figura 8.17 - Distribuição espacial dos três grupos de segmentos de vegetação (i.e., 1 a 3) reconhecidos na área de estudo. Notar a distribuição N-S desses grupos e o fato de suas terminações a sul comporem um alinhamento de direção NE-SW, que é paralelo à direção geral do rio Madeira.

Tabela 8.3 - Área total e média para grupos de segmentos de interesse.

	Total	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Número de segmentos	198	127	44	27
Área (km ²)	4399.33	2300.47	1620.45	478.4
Área média dos segmentos (km ²)	22.22	18.11	36.83	17.72

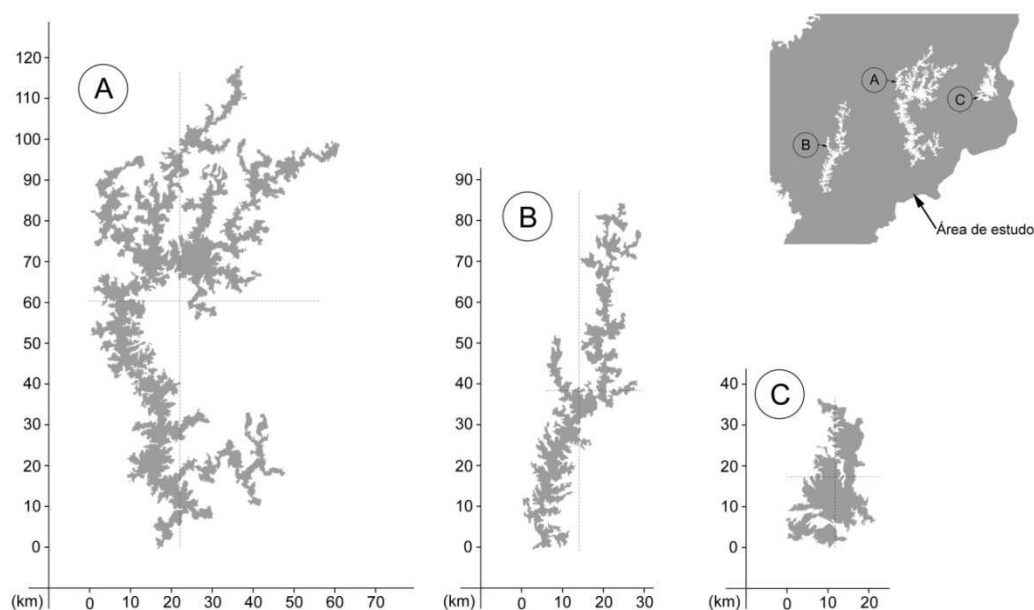


Figura 8.18 - Segmentos com maior valor de área (A-C), selecionados para análise da geometria.

Tabela 8.4 - Valores de atributos expressando propriedades geométricas dos segmentos.

Sigla	Atributo (unidade)	Segmento A	Segmento B	Segmento C
CP	Comprimento máximo (km)	118.43	89.87	37.17
LG	Largura máxima (km)	57.19	23.76	22.16
AT	Área total (km ²)	1.343.12	490.15	321.82
CR	Comprimento médio de ramificações (km)	12.10	4.55	6.41
CL	Razão entre comprimento e largura	2.02	3.78	1.64
IB	Índice de borda	16.83	9.50	6.27
AS	Assimetria	0.70	0.94	0.66
DE	Densidade	1.19	0.95	1.77

Os valores dos atributos baseados em grandezas absolutas revelam que segmentos individuais podem alcançar CP e LG aproximados de 118 km e 57 km, respectivamente, como no caso do segmento A. Os segmentos B e C possuem valores relativamente menores de CP em relação ao segmento A, porém, com diferença aproximada de 53 km entre si. Em relação à LG, entretanto, os segmentos B e C possuem valores bastante

próximos, com diferença inferior a 1 km. Em relação aos valores de AT, nota-se que o segmento A tem valor bastante superior aos demais, sendo que o valor deste atributo para o segmento B representa aproximadamente 36% e 23% dos valores obtidos para os segmentos A e C, respectivamente. Observando-se os valores do atributo CR, nota-se que o segmento A possui valor bastante superior relativamente aos segmentos B e C, sugerindo ramificações mais longas e relativamente mais distantes do eixo principal, além de maior conectividade e menos interrupções.

A análise dos valores do atributo CL indica forma mais delgada para o segmento B, cujo valor é quase duas vezes maior que o do segmento A. O segmento C, por sua vez, apresenta o menor valor de CL, sendo caracterizado por geometria relativamente compacta. Esta análise está de acordo com a interpretação visual destes segmentos, bem como com os valores do atributo DE, que indicam alta e baixa compacidade geométrica respectivamente para os segmentos C e B. Os valores do atributo AS revelam, também, que os segmentos mais delgados (A e B) são mais assimétricos em relação ao segmento C, mais compacto. Apesar da maior compacidade geométrica e menor dissimetria do segmento A em relação ao segmento B, os valores do atributo IB denotam bordas mais irregulares ou retalhadas para aquele segmento. Por outro lado, o segmento C, com alta compacidade e maior simetria, possui bordas relativamente mais suaves em relação aos demais.

O mapa de segmentos de vegetação e a caracterização da geometria destas feições revelaram que estas não apresentam distribuição espacial aleatória, mas são formadas por inúmeros segmentos alongados e sinuosos, que estão em continuidade espacial, principalmente no caso dos grupos 1 e 2. Quando localizadas em áreas de vegetação florestal, os segmentos são menores e de menor continuidade lateral. Porém, a continuidade dos segmentos aumenta para sul, o que é também acompanhado pelo aumento em suas larguras. Em particular, os grupos 1 e 2 são tipicamente caracterizados por serem constituídos de segmentos que se conectam formando ângulos agudos em direção a sul, onde se juntam a troncos principais, o que lhes confere padrão dendrítico.

8.3.1 Segmentos de vegetação e rede de drenagem atual

A maioria dos segmentos de vegetação descritos no item anterior localiza-se em área drenada por sistemas tributários do rio Purus, sendo apenas uma pequena parte situada na margem esquerda do rio Madeira (Figura 8.19). Entretanto, o padrão dendrítico orientado para sul dos segmentos que compõem os grupos 1 e 2 é contrário à orientação principal dos tributários principais do rio Purus, que é de sul para norte.

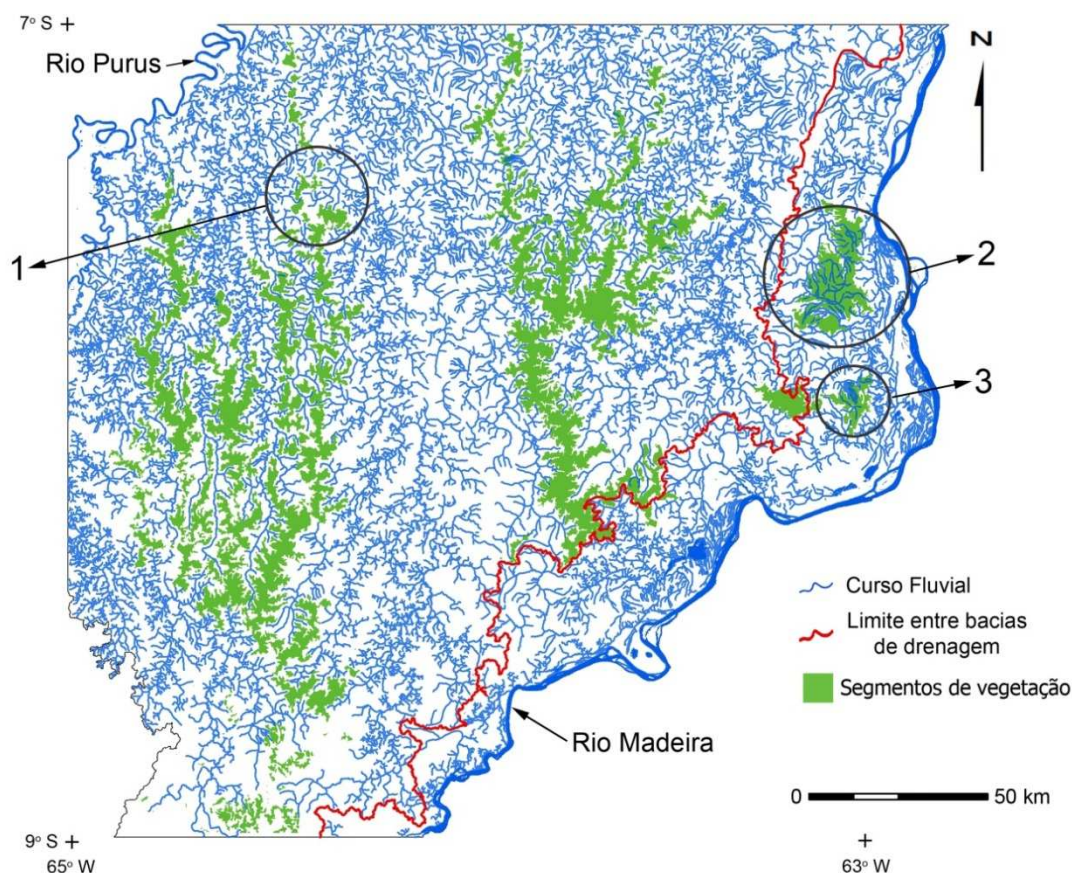


Figura 8.19 - Rede de drenagem da área de estudo e distribuição de segmentos de vegetação (linha vermelha = divisão entre as bacias do rio Purus, a oeste, e do rio Madeira, a leste). Notar que a maioria dos segmentos ocorre na área de influência dos afluentes do rio Purus, estando concentradas nos locais de menor densidade de drenagem representativas dos interflúvios.

Estes segmentos estão distribuídos em áreas onde a densidade de drenagem é baixa, localizando-se preferencialmente em porções interfluviais, e com orientação geral paralela a cursos fluviais maiores. Porém, conforme aumenta-se a densidade de drenagem do centro para as bordas da área de estudo, ocorre maior fragmentação, como na área indicada pela Figura 8.19-1. Entretanto, mesmo onde a densidade de drenagem é alta, a sobreposição entre cursos fluviais e segmentos de vegetação é raro, com exceção dos segmentos localizados na área drenada pelo rio Madeira (Figuras 8.19-2 e 8.19-3).

8.3.2 Segmentos de vegetação e topografia

Quatro perfis altimétricos foram obtidos em campo (Figura 8.20). Estes se restringiram ao grupo 2, por este definir, de forma mais completa, os segmentos de vegetação estudados. Além disto, este grupo é de fácil acesso em sua porção sul e norte por meio das rodovias BR-319 e BR-230, respectivamente. Estes acessos favoravelmente interceptam transversalmente segmentos representados por áreas de savana (sul) e de floresta baixa (norte), favorecendo a comparação da variação de terreno a eles associados.

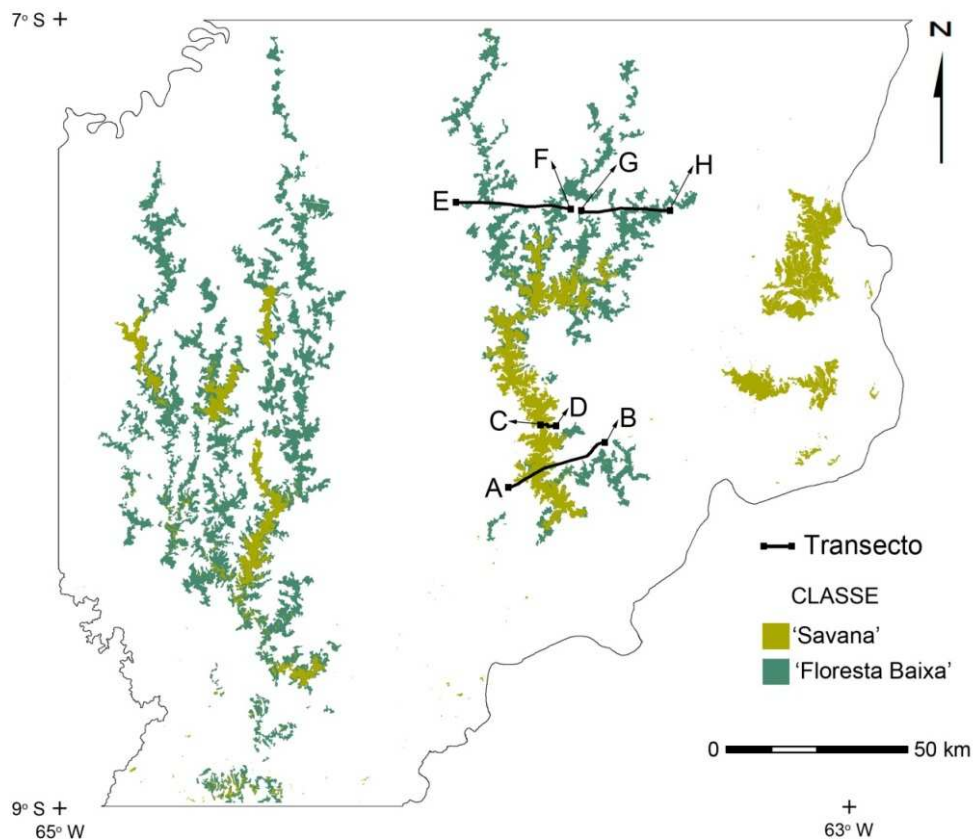


Figura 8.20 - Localização dos perfis altimétricos obtidos na área de estudo. Notar que os transectos A-B e C-D registram transversalmente a passagem entre áreas de savana com floresta densa do entorno, enquanto que os transectos E-F e G-H são transversais a vários segmentos de floresta baixa entre áreas de floresta densa (ver descrição das classes na Tabela 7.1).

Embora o MDE sugira cotas inferiores para as áreas de savana relativamente às áreas de floresta baixa e floresta densa, situação diferente foi revelada em campo. Apesar da natureza predominantemente plana da área de estudo, os perfis altimétricos detalhados revelaram contrastes sutis, porém com gradientes sistemáticos comparando-se as diferentes áreas amostradas. O perfil altimétrico A-B (Figuras 8.21-I e 8.21-II) inicia-se em transecto sobre área de floresta densa (1 e 2), adentrando área localizada sobre o segmento de vegetação de interesse (entre 3 e 13) com o trecho final (entre 14 e 24)

localizado em área de floresta densa. Neste perfil, há tendência geral de aumento das cotas altimétricas em direção aos segmentos, com diferença de aproximadamente 4 m entre a cota mais alta (ponto 7), localizada sobre segmento de interesse, e as cotas mais baixas (2 e 14), localizadas sobre área de floresta densa de seu entorno. Adicionalmente, notou-se queda relativamente abrupta de cotas altimétricas entre os pontos 11 e 13, possivelmente associada à presença de curso fluvial não detectado pelo procedimento de extração da rede de drenagem. Situação análoga ocorre entre os pontos 17-18 e 20-21. É importante observar que, de forma geral, as cotas altimétricas são menores em áreas de floresta densa, exceto na porção final do transecto, correspondente aos últimos 5 km. Neste trecho notou-se inclinação positiva dos valores, porém, não alcançando 80 m, possivelmente devido à influência de outro segmento de interesse localizado a nordeste da feição principal amostrada (ver Figura 8.20).

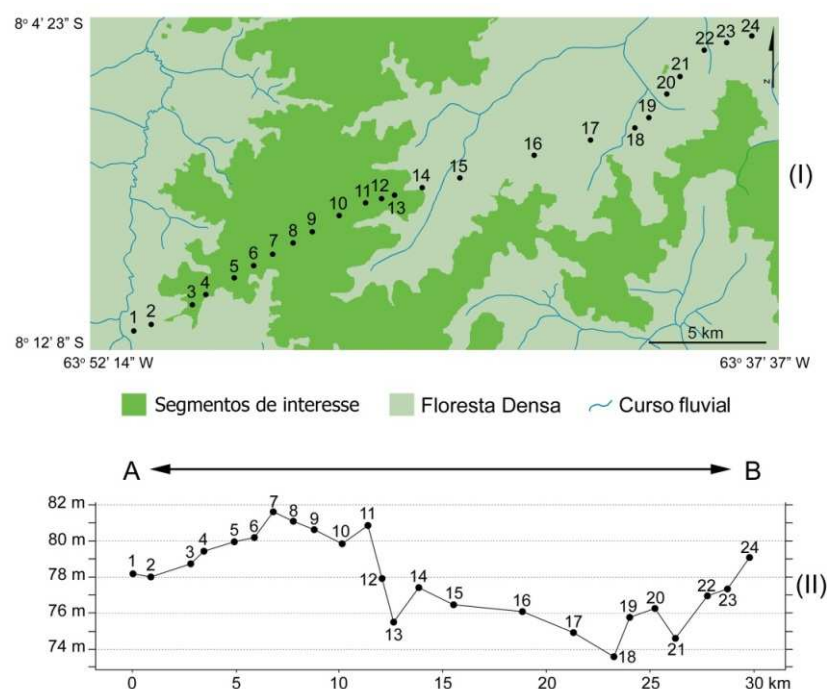


Figura 8.21 - Localização do perfil altimétrico A-B (I) e valores de cotas altimétricas (II). Neste perfil, realizado ao longo da rodovia BR-319, observar que os pontos 1 a 15 registram variações de cotas altimétricas transversalmente ao segmento principal do grupo 2 de segmentos e sua passagem para a área de floresta densa adjacente.

No caso do perfil altimétrico C-D (Figuras 8.22-I e 8.22-II), a diferença máxima entre cotas altimétricas mostra queda de, aproximadamente, 4 m entre áreas de savana (acima de 80 m no ponto 1) e de floresta densa (abaixo de 77 m no ponto 9).

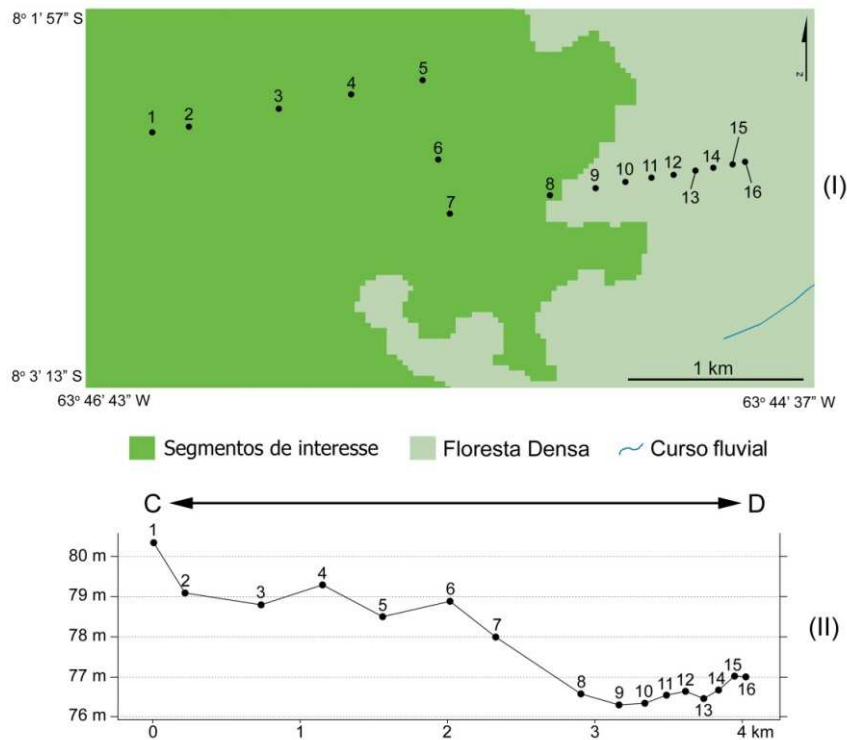


Figura 8.22 - Localização do perfil altimétrico C-D (I) e valores de cotas altimétricas (II). Este perfil, realizado paralelamente ao perfil A-B, registra cotas altimétricas transversalmente ao segmento principal do grupo 2 e sua passagem para a área de floresta densa adjacente.

Para o perfil altimétrico obtido a partir do transecto E-F (Figuras 8.23-I e 8.23-II), observou-se aumento sistemático de cotas altimétricas sobre áreas de floresta baixa nos segmentos de interesse, bem como diminuição destes valores em direção à floresta densa do entorno e nas proximidades de cursos fluviais. Nos locais situados sobre

feições de interesse (4, 6, 7, 12, 13, 17, 18, 19), os valores mantem-se acima de 70 m. Nos locais mais distantes destas feições (9 e 15), os valores são inferiores a 70 m.

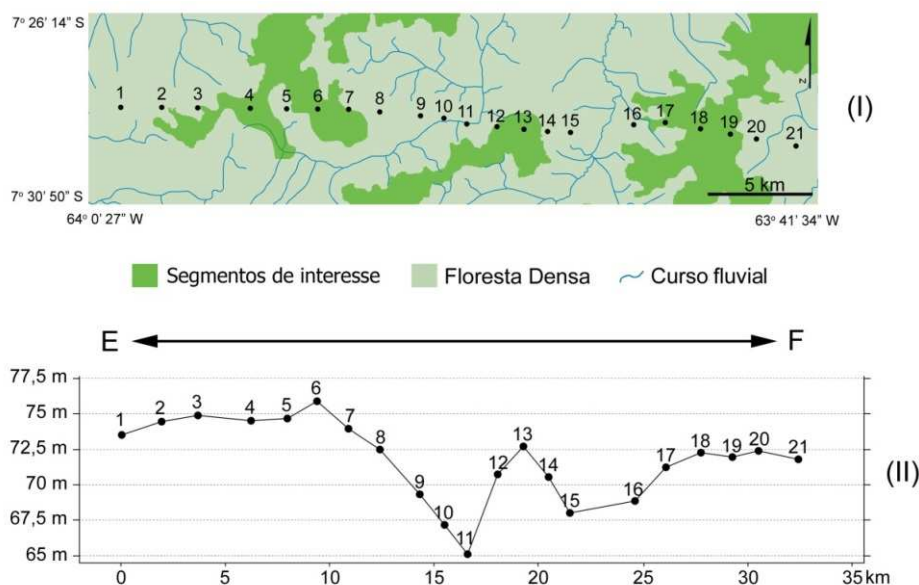


Figura 8.23 1- Localização do perfil altimétrico E-F (I) e valores de cotas altimétricas (II). Neste perfil, realizado ao longo da rodovia BR-230, observa-se aumento de cotas altimétricas sobre segmentos de interesse (floresta baixa), e sua diminuição em direção às áreas de floresta densa, bem como cursos fluviais do entorno.

Situação semelhante às anteriores foi observada para o perfil altimétrico do transecto G-H (Figuras 8.24-I e 8.24-II), onde locais correspondentes a cursos fluviais e floresta densa (22, 25, 27 e 29) exibem valores abaixo de 68 m. Por outro lado, locais correspondentes a segmentos de interesse (23, 24, 28, 32, 33, e 35 a 39), apresentam valores ligeiramente maiores, variando entre 69 m e 73 m, e valores acima de 70 m em suas porções centrais (32, 33 e 37). Observou-se também, apesar das pequenas diferenças altimétricas, que alguns pontos relativamente distantes de cursos fluviais apresentam altitudes também superiores a 70 m (p.e. 26). Estes podem corresponder a

segmentos de vegetação de interesse neste estudo, porém não identificados pelo processo de classificação.

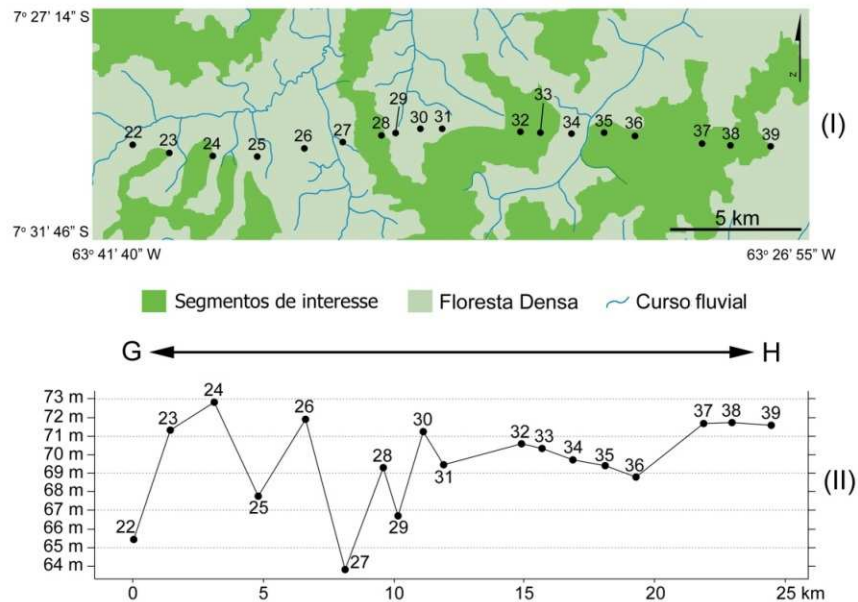


Figura 8.24 - Localização do perfil altimétrico G-H (I) e valores de cotas altimétricas (II). Notar neste perfil, realizado ao longo da rodovia BR-230, aumento de cotas altimétricas sobre segmentos de interesse (floresta baixa) e sua diminuição em direção às áreas de floresta densa, bem como a cursos fluviais do entorno.

9. DISCUSSÃO

9.1 Avaliação da extração semi-automática de segmentos de vegetação

Os resultados desta pesquisa revelaram que imagens ópticas e subprodutos obtidos a partir destas não foram suficientes à caracterização de segmentos de vegetação na área de estudo. Isto se deve ao fato de que grande parte dos segmentos mapeados localizarem-se em áreas de vegetação florestal, onde não ocorrem contrastes espectrais que possibilitem sua individualização. Por outro lado, a utilização de diferenças espectrais presentes na banda do infravermelho próximo mostrou que mudanças de savana para outros tipos de vegetação aberta são diretamente refletidas na quantidade de radiação emitida nesta faixa espectral. Variações na estrutura e composição da vegetação, bem como a maior ou menor área ocupada por elementos de fundo (p.e. solo exposto), podem explicar essas diferenciações espectrais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Complementarmente aos atributos obtidos exclusivamente pelas propriedades espectrais, atributos de vizinhança foram de suma importância para individualização entre áreas de savana e outros tipos de vegetação aberta. Isto foi evidenciado pelo modelo preditivo obtido a partir das amostras selecionadas. Neste modelo, obtido por meio da técnica de classificação por árvore de decisão, os cursos fluviais extraídos manualmente e sua relação de proximidade com áreas de savana, possibilitaram a individualização de grande parte das áreas de savana em detrimento de outras características ou propriedades espectrais das imagens. Estes dados vetoriais foram explorados também para extração de segmentos localizados em áreas florestais, reforçando sua importância na classificação das imagens e permitindo estabelecer padrão de ocorrência para essas áreas similar aos de áreas de savana, ou seja, em áreas de baixa densidade de drenagem.

A utilização do MDE de forma complementar as imagens ópticas permitiu ampliar significativamente a visualização e extração de segmentos de interesse. Primeiramente, a aplicação de esquemas de cores para realce de contrastes altitudinais neste MDE permitiu ampliar a visualização de feições localizadas em áreas de domínio florestal. Este tipo de abordagem já havia sido utilizado com sucesso para a extração manual de

segmentos de vegetação relacionados a feições paleomorfológicas em outras áreas amazônicas (ALMEIDA-FILHO; MIRANDA, 2007; MANTELLI, 2008; HAYAKAWA et al., 2010a). Entretanto, este trabalho mostrou que é possível explorar MDE ressaltados por esquemas de cores no processo de classificação de imagens sob a forma de imagens RGB. Neste processo, que compreendeu a integração do MDE com outros dados geoespaciais, os segmentos de vegetação foram extraídos de forma semi-automática.

Adicionalmente, a transferência de áreas classificadas a partir de imagens ópticas para o nível de segmentação obtido a partir do MDE se revelou de grande importância para a extração de segmentos de vegetação no ambiente amazônico em questão. Em especial, destaca-se a utilização das áreas classificadas anteriormente durante a extração de novos segmentos. Por exemplo, a utilização de pequenos fragmentos de vegetação de savana derivados de imagens ópticas facilitou a extração de segmentos marcados por contrastes altitudinais no MDE que ocorrem de forma isolada em áreas florestais. Isto se deu pelo fato de atributos de vizinhança permitirem identificar quais destes segmentos estão em contato físico com os fragmentos de savana por meio de atributos de vizinhança, assegurando a relação de continuidade entre segmentos florestais e áreas de savana identificadas visualmente.

Os resultados deste trabalho mostraram avanços no procedimento de extração semi-automática de segmentos de vegetação na área em questão. Porém, ressalta-se que a extração completa dessas feições só foi possível com a interferência do intérprete por meio de edição manual de polígonos. Pelo fato de grande parte dos segmentos ter sido extraída de forma automática, a redução em tempo nesta tarefa deve ser considerada em aplicações similares. Consequentemente, é estimulado o uso de metodologias semelhantes para o mapeamento de segmentos de vegetação em grandes áreas.

9.2 Significado dos dados extraídos do MDE-SRTM

É importante salientar que contrastes altitudinais encontrados no MDE não correspondem necessariamente a variações da morfologia do terreno. Isto porque os diferentes tipos de cobertura vegetal presentes na superfície do relevo podem atuar de forma a interferir na penetração da banda C (5,6 cm) utilizada na aquisição desses

dados. Por essa razão, os valores altimétricos em MDE-SRTM obtidos para áreas florestais podem corresponder a altitudes de elementos de dosséis florestais localizados a muitos metros acima da superfície do solo. Este efeito do dossel nos valores altimétricos em MDE-SRTM foi descrito por Kelndorfer et al. (2004).

A partir do exposto acima, áreas de vegetação aberta adjacentes a áreas de vegetação florestal podem ser representadas como terrenos falsamente rebaixados no MDE. Esta situação foi observada anteriormente em áreas amazônicas, onde a natureza predominantemente plana do relevo acentua a dificuldade de reconhecimento da morfologia real (VALERIANO et al., 2006). Além disto, o efeito de fotocompensação em dosséis florestais pode resultar em maior dificuldade de identificação de morfologias côncavas e convexas em terrenos suavemente ondulados em função da estratificação ou nivelamento da altura dos dosséis em função da busca por luz.

Para o caso da área de estudo, a integração do MDE com informações de campo levou a concluir que o efeito dossel contribuiu de forma positiva no delineamento de segmentos de vegetação. Entretanto, ressalta-se que as variações altitudinais registradas neste produto são opostas aos valores constatados no terreno. Assim, a combinação desses dados com produtos ópticos e informações de campo revelou que, apesar das áreas de savana e de floresta baixa mostrarem altitudes inferiores às áreas de floresta densa, elas correspondem a terrenos relativamente mais elevados, contrariamente ao indicado no MDE. Primeiro isto foi sugerido pelo fato das áreas de altitudes inferiores no MDE, que correspondem a locais onde são encontrados os segmentos de vegetação de interesse, atuarem como divisores dos sistemas de drenagem atuais. Segundo, esta conclusão ficou evidenciada pelo resultado do levantamento topográfico realizado em campo, quando se pode constatar que perfis topográficos transversais a estes segmentos revelaram que os mesmos correspondem às áreas de relevo negativo no MDE, ou seja, tem valores altitudinais positivos no terreno. Estes dados confirmaram que os segmentos de vegetação de interesse estão situados em porções interfluviais, ocupando áreas topograficamente mais elevadas em relação às suas adjacências (Figura 9.1). Trabalho anterior registrou situação análoga em outras áreas amazônicas, sendo que os segmentos de vegetação correspondem a feições paleomorfológicas (paleocanais amazônicos) e cujo gradiente topográfico foi atribuído a convexidades deposicionais em diques

marginais e barras, aliado à compactação diferencial resultante de variações litológicas oriundas da colmatação de canais fluviais antigos (MANTELLI, 2008).

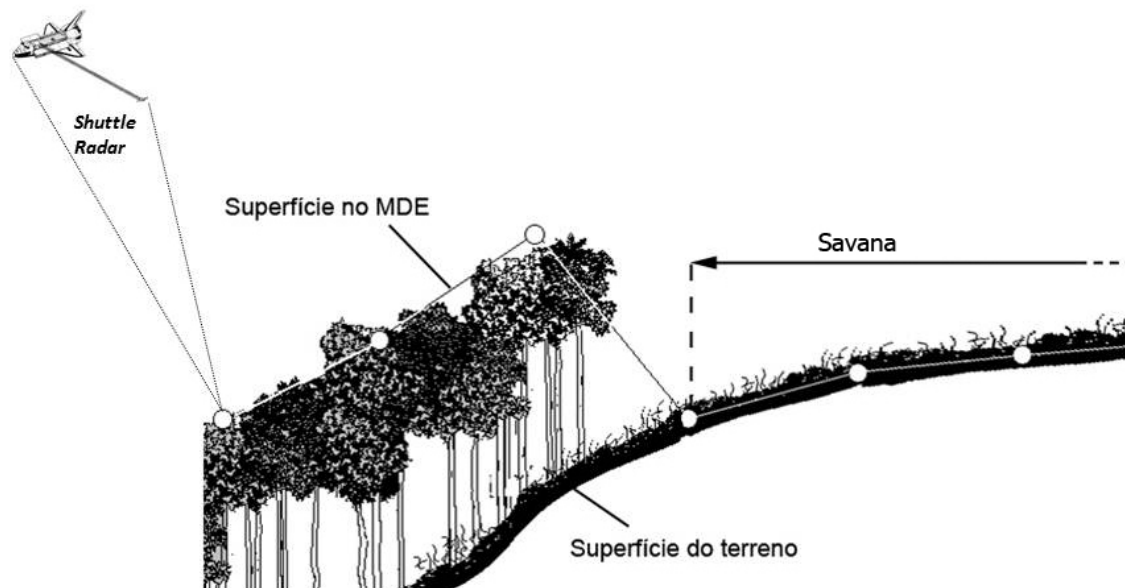


Figura 9.1 - Esquema ilustrando morfologia positiva do relevo em áreas cobertas por vegetação de savana em relação a áreas de floresta adjacentes, bem como da superfície obtida por MDE derivados dos dados SRTM, na qual áreas de savana localizam-se em posição topográfica inferior em relação à floresta densa devido à interação do sinal com elementos de dosséis florestais.

Fonte: Adaptado de Valeriano et al. 2006.

De acordo com as interpretações acima, os valores altimétricos obtidos para o MDE são influenciados por dois fatores principais. Estes incluem a morfologia da superfície do relevo e as variações composicionais e/ou estruturais na vegetação. Estes fatores podem ter atuado de forma individual ou conjunta na geração de contrastes altitudinais verificados no MDE para a área de estudo.

9.3 Interpretação de segmentos de vegetação

A geometria e a distribuição espacial dos segmentos alongados de vegetação de savana e de floresta baixa revelados pela classificação de imagens de sensoriamento remoto foram de grande importância para se concluir que sua presença é controlada por feições pré-existentes no terreno, correspondentes a paleodrenagens. Em particular, isto foi demonstrado pelo fato dos segmentos de floresta baixa ocorrerem em continuidade com os segmentos de savana, formando cinturões alongados e sinuosos que convergem progressivamente em uma direção preferencial, formando ângulos agudos. Este padrão geométrico é similar à organização dendrítica de canais em sistemas fluviais modernos. Dada esta comparação, interpreta-se que os segmentos ressaltados por diferenças vegetacionais da área de estudo correspondem a sistemas de drenagem antigos de padrão predominantemente dendrítico, que foram abandonados na paisagem. É interessante mencionar que estudos sedimentológicos e cronológicos inéditos, derivados de amostras de testemunhos de sondagem analisadas em paralelo à realização da presente pesquisa nesta mesma área, confirmaram a presença de sucessões sedimentares pleistocenas tardias a holocenas comumente verificadas em depósitos resultantes do preenchimento de canais.

O fato dos segmentos com arranjo dendrítico detectados na área de estudo mostrarem convergência de canais para sudeste sugere fluxos canalizados nesse sentido. É relevante notar que tal orientação da paleodrenagem é contrária à orientação noroeste dos sistemas de drenagem atuais principais do interflúvio Madeira-Purus, onde a área de estudo está localizada. A maioria dos canais atuais dessa área forma sistemas tributários do rio Purus, com apenas curtos canais que drenam o rio Madeira a sudeste. Por essa razão sugere-se que, contrariamente à situação atual de domínio de tributários do rio Purus, no Pleistoceno-Holoceno a área de estudo era dominada por drenagens correspondentes a sistemas de tributários que desaguavam no rio Madeira. Esta interpretação implica em configuração pretérita do sistema de drenagem do rio Madeira em que seus tributários da margem esquerda eram bem mais extensos do que seus tributários atuais nessa localidade.

Se esta reconstituição acima for correta, pode-se concluir que houve inversão de drenagem do fluxo fluvial na área de estudo nos últimos milhares de anos de sua

evolução. Esta inversão de drenagem sugere mudanças significativas no terreno, que pode ter sofrido ligeira inclinação para noroeste, com a consequente reorganização dos sistemas de drenagem devido a reativações neotectônicas. Embora estudos enfocando a rede de drenagem atual não façam parte da presente pesquisa, é interessante observar que esta conclusão é consistente com resultados derivados de estudo recente, que descreveu alta assimetria de drenagem na bacia do rio Madeira, na porção localizada imediatamente a nordeste da área de estudo (HAYAKAWA et al., 2010a). De acordo com esses autores, outras anomalias de drenagem foram registradas nesta área que, no conjunto, foram relacionadas a basculamentos do terreno em função da reativação de falhas tectônicas durante o Quaternário tardio. Adicionalmente, diversas morfologias fluviais da bacia deste rio a sudoeste da área de estudo foram atribuídas a causas tectônicas (SOUZA FILHO et al., 1999). O abandono de drenagens em outras áreas da região amazônica foi também relacionado a fatores tectônicos (p.e. ALMEIDA-FILHO; MIRANDA, 2007; ROSSETTI et al., 2007, 2008).

A distribuição espacial das paleodrenagens na área de estudo e seu deslocamento regular em relação ao rio Madeira sugerem possível relacionamento com rias fluviais. Rias são formadas quando sistemas tributários tornam-se parcial ou totalmente desconectados do rio principal no qual deságuam, sendo comuns no sistema amazônico atual. Rias fluviais localizadas a norte da área de estudo, na margem esquerda do rio Solimões (Figura 9.2), servem de análogo recente ao sistema de paleorias proposto para o rio Madeira. Essas rias modernas foram formadas à medida que o rio Solimões, inicialmente mais meandrante que o atual, migrou localmente para sul, deixando para trás uma extensa paleovárzea pontuada por inúmeros lagos. No decorrer deste processo, as desembocaduras de vários de seus sistemas tributários foram bloqueadas à medida que houve distanciamento do canal principal. Com o bloqueamento das desembocaduras, o fluxo fluvial ficou interrompido, resultando no alagamento de extensas áreas dos vales tributários e, conseqüentemente, gerando as rias.

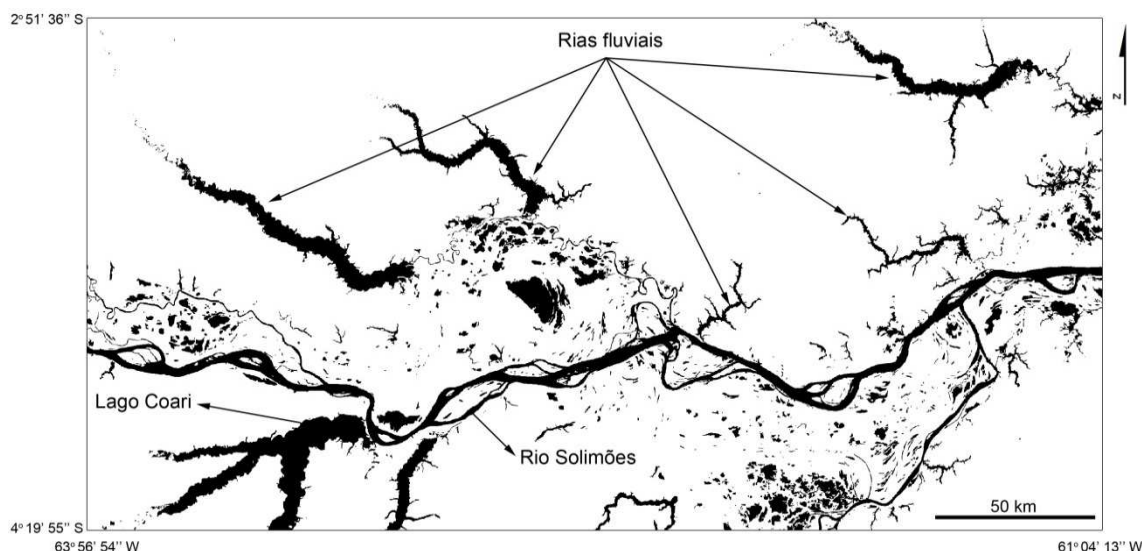


Figura 9.2 - Rias fluviais localizadas a norte da área de estudo. Notar distanciamento destas feições com relação ao rio Solimões, similar ao que ocorre entre as paleorias e o rio Madeira.

Por comparação com as rias do rio Solimões, especula-se que o rio Madeira tenha mudado sua posição com o tempo, ocupando posição a leste de seu curso original na área de estudo. À medida que este processo ocorreu, seus tributários da margem esquerda tornaram-se abandonados no terreno. Deslocamento do curso principal do rio Madeira foi parcialmente registrado a nordeste da área de estudo (HAYAKAWA et al., 2010a). A finalização de todos os sistemas de paleodrenagem em distâncias equivalentes com relação ao rio Madeira, formando um alinhamento paralelo a este rio (ver Figura 8.17), é relacionada à mudança de seu curso para leste. Este processo pode ter bloqueado as desembocaduras dos tributários, causando o afogamento dos sistemas de drenagem e, consequentemente, originando rias.

Especula-se que basculamentos no terreno tenham promovido interrupção dos antigos sistemas de tributários a certa distância a oeste do canal atual do rio Madeira, resultando no desenvolvimento de rias. Com o tempo, estas foram totalmente colmatadas. Como mencionado no capítulo 4, existem diferentes hipóteses para a origem de rias na bacia amazônica, sendo que várias delas incluem o fator tectônico (FRANZINELLI, IGREJA, 1990; STERNBERG, 1950; TRICART, 1977). De acordo com esses autores, a gênese

de rias fluviais implica na presença de zonas de falhas e movimentação de blocos, cujos efeitos resultam em muitas das características morfológicas descritas acima. Entretanto, informações adicionais, principalmente referentes à análise morfoestrutural detalhada, serão necessárias para se discutir melhor estas interpretações, tarefa que foi programada para ser realizada em futuro próximo.

9.4 Distribuição de vegetação

Como constatado pelos resultados deste trabalho e pela análise de mapas de vegetação disponíveis na literatura (p.e. RADAMBRASIL, 1978), a área de estudo é representada principalmente por vegetação de floresta densa, com abundância de segmentos de vegetação aberta adjacentes à vegetação florestal. O mapeamento destes contrastes vegetacionais, bem como de outros contrastes sutis entre vegetações de floresta densa alta e baixa, foi de grande contribuição para sua atribuição a morfologias fluviais passadas (ver item 9.3). Esta interpretação configura-se como hipótese alternativa a interpretações anteriores, que relacionaram contrastes vegetacionais na área de estudo a flutuações climáticas quaternárias (FREITAS et al., 2001; PESSENDA et al., 1998, 2001; VIDOTTO et al., 2007).

Visto que áreas de savana e floresta baixa encontradas na área de estudo representam antigos sistemas deposicionais, pode-se concluir que a história geológica desta área teve forte influência no desenvolvimento dos padrões vegetacionais atuais. Isto ocorre porque os diferentes tempos de abandono dos sítios deposicionais, sobre os quais ocorrem os tipos de vegetação, resultam em substratos com características geológicas, pedológicas e topográficas variadas, determinando os contrastes florestais. Estas interpretações condizem com as obtidas em outras áreas amazônicas onde ocorrem contrastes vegetacionais também associados a paleomorfologias Quaternárias. Por exemplo, na ilha de Marajó, nordeste da Amazônia, situação similar foi relatada para contrastes entre vegetação, estes indubitavelmente associados a paleocanais (ROSSETTI et al., 2010). Estes autores sugerem que os depósitos sedimentares formados em canais abandonados ao longo do Pleistoceno-Tardio e Holoceno favoreceram a instalação de vegetações abertas, do tipo gramínea e arbustiva. Este tipo de vegetação, dominante sobre as áreas de paleocanais nos estágios iniciais de sua

colmatação, é gradualmente substituída por vegetação florestal à medida que o processo de abandono prossegue.

O avanço de vegetação florestal sobre áreas de savana e de vegetação florestal baixa aberta constatado na área de estudo aumenta à medida que ocorre maior número e extensão de tributários, o que pode ser explicado pelo diagrama elaborado a partir dos segmentos de vegetação mapeados na área de estudo (Figura 9.3).

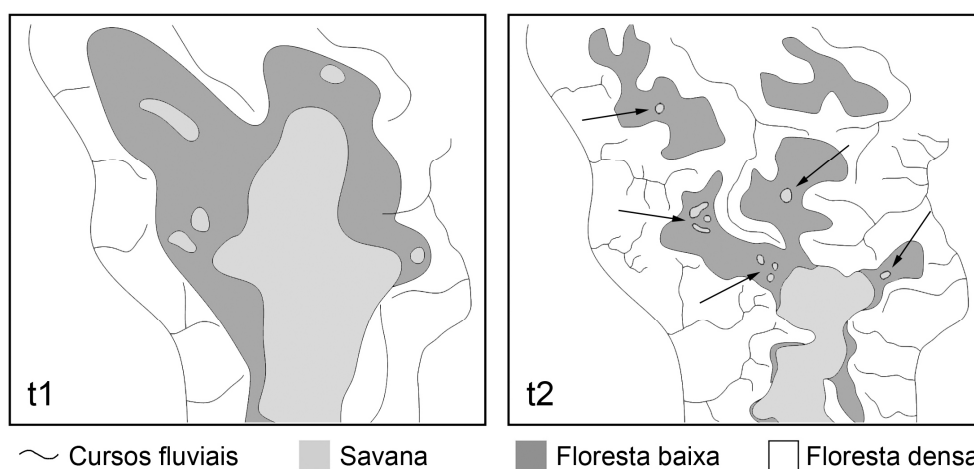


Figura 9.3 - Diagrama ilustrando esquematicamente o processo de avanço de áreas de vegetação florestal sobre áreas de savana e de floresta baixa, concomitantemente ao desenvolvimento da rede de drenagem ao longo do tempo (tempo aumenta de t1 para t2). Notar que as áreas de savana e floresta baixa diminuem com o tempo, tornando-se mais fragmentadas. Observar, ainda, que a presença de fragmentos menores de savana em áreas de floresta baixa implica no avanço daquela sobre esta (t1 e t2). As setas em t2 mostram pequenos fragmentos de savana em contraste com vegetação florestal.

Portanto, pode-se estabelecer, como modelo geral, que a desativação de sítios deposicionais representativos de sistemas fluviais resulta em paleomorfologias fluviais que consistem principalmente de paleocanais. Tão logo estes se tornam abandonados,

são cobertos por espécies vegetais gramíneas e arbustivas. Com o passar do tempo, o desenvolvimento da rede de drenagem atual altera as condições de drenagem em superfície e subsuperfície, facilitando o avanço de vegetação florestal sobre estas áreas. Este avanço ocorre de forma gradual, sendo que áreas de savana são primeiramente substituídas por áreas de floresta baixa. Estas, por sua vez, são posteriormente colonizadas por espécies arbóreas derivadas de áreas de floresta densa, como espécies emergentes (Figura 9.4).

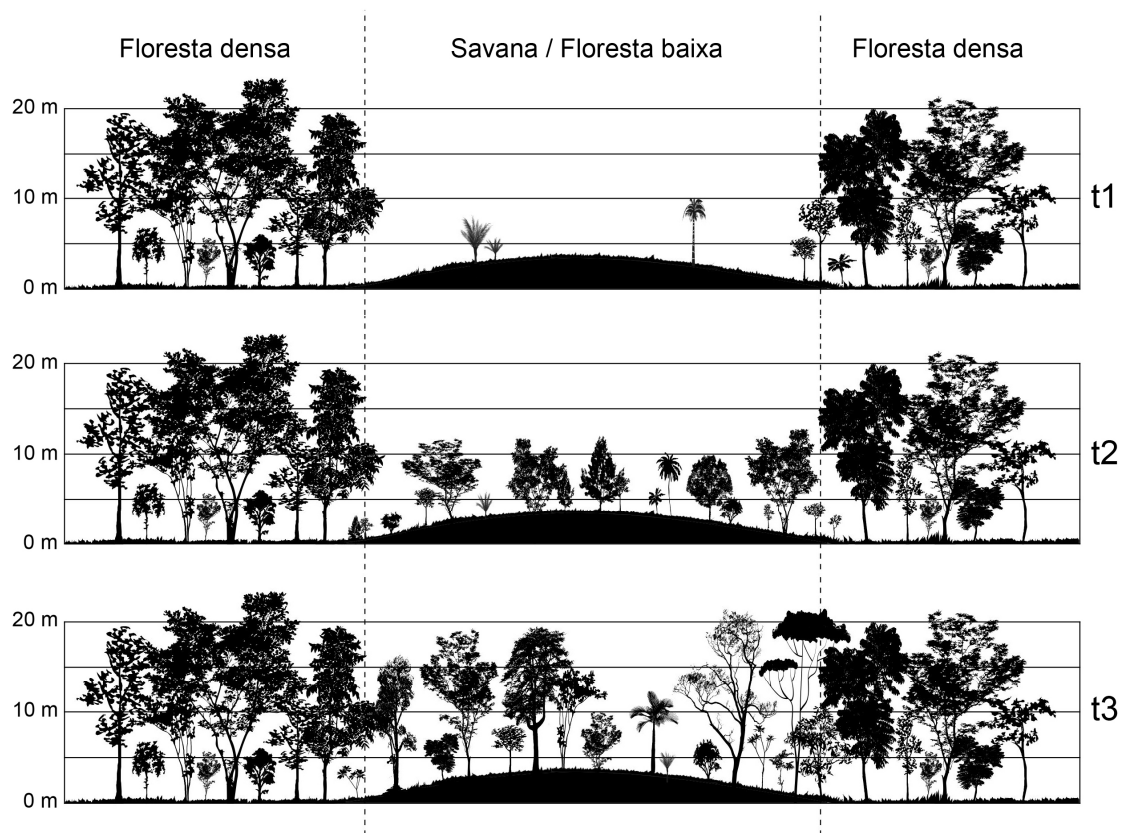


Figura 9.4 - Modelo geral dos padrões vegetacionais que ocorrem sobre sítios deposicionais abandonados, representados pela área demarcada como Savana / Floresta baixa, ao longo do tempo (tempo aumenta de t1 para t3). Notar que com o passar do tempo, áreas de vegetação aberta (t1) são gradualmente substituídas por espécies florestais (t2), favorecendo o estabelecimento de áreas de floresta densa (t3).

10. CONCLUSÕES

- a) Os resultados desta pesquisa mostraram que imagens Landsat foram de grande utilidade para classificação de contrastes vegetacionais bruscos entre vegetação aberta e florestal, porém, a utilização de contrastes altitudinais em MDE-SRTM foi decisiva para ampliar a detecção de contrastes vegetacionais sutis em áreas florestais.
- b) A integração de imagens Landsat e MDE-SRTM no processo de classificação, por meio da técnica de AOO, resultou em aumento significativo do número de segmentos classificados representativos dos contrastes vegetacionais da área de estudo, atuando de forma positiva para classificação dos segmentos de vegetação de interesse. Adicionalmente, esta técnica permitiu que fossem incorporados, no processo de classificação, vetores de cursos fluviais pré-existentes, aumentando sua exatidão. Esta técnica possibilitou a extração semi-automática desses segmentos, o que estimula seu uso em abordagens semelhantes para estudos regionais que envolvam mapeamento de vegetação em áreas amazônicas.
- c) A análise dos resultados de classificação de vegetação revelou que a distribuição dos segmentos de savana e de floresta baixa não é aleatória, mas seguem padrões regulares dendríticos que puderam ser associados a morfologias fluviais abandonadas no terreno, principalmente salientando canais colmatados.
- d) A integração de dados de sensoriamento remoto com perfis topográficos, realizados em campo e orientados transversalmente às feições sugestivas de paleocanais, demonstrou que os segmentos de savana e de floresta são confinados a áreas ligeiramente mais elevadas que seus entornos. Esta conclusão foi contraditória com contrastes altitudinais derivados do MDE, o que se deve à influência da altura e biomassa dos dosséis florestais, resultando em relação duplamente negativa que, apesar do relevo positivo, resultam em áreas rebaixadas ou “depressões” no MDE.
- e) A preservação das paleomorfologias na paisagem depende da intensidade de atuação dos processos fluviais atuais a elas superimpostas. Assim, sua maior fragmentação ocorre à medida que a quantidade e extensão de tributários atuais aumentam. Consequentemente, estudos que visem melhor

detalhar as características dos sistemas de drenagem atual, explorando propriedades como densidade e padrões de drenagem, bem como limites entre terraços fluviais e entre drenagens, podem contribuir para ampliar a caracterização de paleomorfologias no interflúvio Madeira-Purus.

f) A íntima associação entre segmentos de savana e de floresta baixa com paleocanais permite propor que a distribuição dos tipos vegetacionais atuais da área de estudo reflete diretamente a evolução dos sistemas fluviais ao longo do final do Quaternário. De acordo com o modelo evolutivo proposto, cinturões de savana revelam os últimos estágios de abandono dos sítios deposicionais. Já os segmentos de floresta baixa correspondem a áreas com tempo de abandono maior, que se tornaram favoráveis ao estabelecimento de espécies florestais. A continuidade deste processo levará à obliteração total das paleomorfologias, pela uniformização da vegetação a elas sobrepostas com a vegetação de floresta do entorno.

g) Especula-se que a movimentação do terreno por basculamento tectônico tenha afetado o interflúvio Purus-Madeira durante o final do Quaternário, o que levou ao deslocamento do canal principal do rio Madeira para sudeste. Como consequência, houve forte inversão de drenagem de sul/sudeste para norte/noroeste, com abandono dos sistemas tributários do rio Madeira, sua conversão em rias que foram posteriormente colmatadas, e estabelecimento das drenagens tributárias do rio Purus. Este modelo de evolução tem grande implicação em estudos de reconstituição paleoclimática, já que na literatura prevalece um modelo que explica os cinturões de savana da área de estudo como decorrência exclusiva de episódios climáticos áridos passados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDINK, E. A.; DE JONG, S. M.; PEBESMA, E. J. The importance of scale in object-based mapping of vegetation parameters with hyperspectral imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 8, p. 905-912, 2007.

ADDINK, E. A.; KLEINHANS, M. G. Recognizing meanders to reconstruct river dynamics of the Ganges. In: GEOGRAPHIC OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS CONFERENCE, 2, Calgary. **Proceedings...** Calgary: UC, 2008, p. 1-6.

ALMEIDA-FILHO, R.; MIRANDA, F. P. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas Archipelago, Central Amazônia, Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 387-392, 2007.

ANDERSON, A. B. White sand vegetation of Brazilian Amazonia. **Biotropica**, v. 13, p. 199-210, 1981.

APOLUCENO NETO, A. F.; TSUBONE, K. A descoberta de petróleo do Rio Urucu, Bacia do Solimões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2, 1988, Belém. **Anais...** São Paulo: SBG, 1988, p. 2416-2427.

BAATZ, M.; HOFFMANN, C.; WILLHAUCK, G. Progressing from object-based to object-oriented image analysis. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G.J. (eds.) **Object based image analysis**. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 2008. p. 29-42.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: ANGEWANDTE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSVERARBEITUNG, 12, 2000, Heibelberg. **Proceedings...** Heidelberg: Wichmann-Verlag, 2000.

BENITO, G.; BAKER, V. R.; GREGORY, K. J. **Palaeohydrology and Environmental Change**, Chichester: Wiley. 1998.

BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-

ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 3-4, p. 239-258, 2004.

BISPO, P. C. **Dados geomorfológicos como subsídio ao mapeamento da vegetação**. 2007. 128 p. (INPE-14813-TDI/1255). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

BLASCHKE, T.; BURNETT, C.; PEKKARINEN, A. New contextual approaches using image segmentation for object-based classification. In: DE MEER, F.; DE JONG, S. (Eds.) **Remote sensing image analysis: including the spatial domain**. Dordrecht: Kluwer, 2004. p. 211-236.

BLASCHKE, T.; HAY, G. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multi-scale landscape structure. In: CHALLENGES IN GEOSPATIAL ANALYSIS, INTEGRATION AND VISUALIZATION, 2001, Athens, Georgia. **Proceedings...** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, part 4/W5, 2001. p. 22-29.

BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP, E.; STROBL, J.; ZEIL, P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/Remote Sensing environment and perspectives for environmental applications. **Environmental Information for Planning**, v. 2, p. 555-570, 2000.

BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. **GIS-Zeitschrift für Geoinformationssysteme**, v. 6, p. 12-17, 2001.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n.1, pp. 2-16, 2010.

BRAUN, E. H. G.; RAMOS, J. R. A. estudo agroecológico dos Campos Puciari-Humaitá - Estado do Amazonas e Território Federal de Rondônia. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 21, n. 4, p. 443-498, 1959.

BURBANK, D. W.; ANDERSON, R. S. **Tectonic geomorphology**. London: Blackwell Science, 2001. 274p.

BURNETT, C.; BLASCHKE, T. A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. **Ecological Modelling**, v. 168, n. 3, p. 233-249, 2003.

CAPUTO, M. V. Solimoes megashear: interplate tectonics in Northwestern Brasil. **Geology**, v. 19, p. 246-249, 1991.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da bacia do Amazonas - Histórico e Atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. **Anais...** Belém: SBG, v.3, 1972. p. 35-46.

CAPUTO, M. V.; SILVA, O. B. Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. In: GABAGLIA; G. P. R.; MILANI; E. J. **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: CENPES, 1990. p. 169-192.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Tese de Doutorado - University of California (UCLA) Santa Barbara: UCLA, 1984. 586 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 313p.

COLSTOUN; E. C. B.; STORY, M. H.; TRHOMPSON, C.; COMISSO, K; SMITH, T. G.; IRONS, J. R. National Park vegetation mapping using multitemporal Landsat 7 data and a decision tree classifier. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p. 316-327, 2003.

CUNHA, B. C. C. Geologia do extremo sul-oriental da Amazônia Legal Brasileira In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1 Belém. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, 1982, p. 54-74.

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, n.1, p. 47-55, 1994.

DE JONG, S. M.; VAN DER MEER, F. D. (eds) **Remote sensing image analysis including the spatial domain**. Dordrecht: Kluwer academic Publishers, 2004.

DEFINIENS. **Definiens developer 7**: reference book. Munique: Definiens AG, 2007. 197 p. Versão do documento: 7.0.2.936.

DOYLE, G.; INGGS, M. Dual-frequency multi-polarimetric SAR as a tool for palaeo-drainage mapping in the Northern Cape Province. In: PROCEEDINGS OF THE 1998 SOUTH AFRICAN SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING-COMSIG, 1, Cape Town. **Anais...** Cape Town: IEEE, 1998, p.339-342.

EIRAS, J. F.; BECKER, C. R.; SOUZA, E. M.; GONZAGA, J. E. F.; SILVA, L. M.; DANIEL, L. M. F.; MATSUDA, N. S.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Solimões. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, n.1, p. 17-45, 1994.

ESCH, T.; THIEL, M.; BOCK, M.; ROTH, A.; DECH, S. Improvements of image segmentation accuracy based on multiscale optimization procedure. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 3, p. 463-467, 2008.

FLANDERS, D.; HALL-BEYER, M.; PEREVERZOFF, J. Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 4, p. 441-452, 2003.

FRANZINELLI, E.; IGREJA, H. L. S. Utilização de sensoriamento remoto na investigação na área do baixo Rio Negro e Grande Manaus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6, 1990, Manaus. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1990. p. 641-648.

FREITAS, H. A.; PESSENDA, L. C. R.; ARAVENA, R.; GOUVEIA, S. E. M.; RIBEIRO, A. S.; BOULET, R. Late Quaternary vegetation dynamics in the southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter. **Quaternary Research**, v. 55, p. 39-46, 2001.

FRIEDL, M.; BRODLEY, C. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 3, p. 399-409, 1997.

GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; NELSON, S. G. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. **Sensors**, v. 8, p. 2136-2160. 2008.

GONZAGA, F. G.; GONÇALVES, F. T. T.; COUTINHO, L. F. C. Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modeling of hydrocarbon generation and migration. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (eds.) **Petroleum systems of South Atlantic Margins**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 159-178.

GOUDIE, A. S. **Encyclopedia of geomorphology**. Oxford: Routledge, 2004. 1156p.

HAFFER, J.; PRANCE, G. T. Climatic forcing of evolution in Amazonia during the Cenozoic: On the refuge theory of biotic differentiation. **Revista do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo**, v. 46, p. 1-33, 2001.

HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update. **SIGKDD Explorations**, v. 11, n. 1, 2009.

HAMILTON, S. K.; KELLNDORFER, J.; LEHNER, B.; TOBLER, N. Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). **Geomorphology**, v.89, p. 23-28, 2007.

HAN, J.; KAMBER, M. **Data Mining: Concepts and Techniques**. San Francisco: Elsevier, 2006. 743p.

HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. Survey: Image segmentation techniques. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 29, p. 100-132, 1985.

HAY, G. J.; BLASCHKE, T.; MARCEAU, D. J.; BOUCHARD, A. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 5-6, p. 327-345, 2003.

HAY, G. J.; CASTILLA, G. Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. (eds.) **Object based image analysis**. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 2008. p. 93-112.

HAY, G.J.; CASTILLA, G.; WULDER, M. A.; RUIZ, J. R. An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, n. 4, p. 339-359, 2005.

HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Applying DEM-SRTM for reconstructing a late Quaternary paleodrainage in Amazonia. **Earth and Planetary Sciences Letters**, v. 297, p. 262-270, 2010a.

HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F.; BERTANI, T.C. Imagens Landsat-5/TM e modelos digitais de elevação SRTM aplicados à análise de savana em áreas florestais amazônicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 3219-3226.

HAYAKAWA, E. H.; ZANI, H.; ANDRADES FILHO, C. O.; BERTANI, T. C.; ROSSETTI, D. F. Identificação de paleocanais na Bacia Amazônica a partir de dados de sensoriamento remoto. **Revista de Geografia (Recife)**, v. especial, n.1, 2010b.

HOWARD A.D. Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 51, p. 2246-2259, 1967.

HUANG, C. H.; YANG, L.; HOMER, C. Synergistic use of FIA plot data and Landsat-7/ETM+ images for large area forest mapping. In: ANNUAL MIDWEST FOREST MENSURATIONISTS MEETING, 35, 2001, Traverse City, MI. **Proceedings...** Sioux Falls: USGS, 2001.

HUANG, X.; JENSEN, J. R. A machine-learning approach to automated knowledge-base building for remote sensing image analysis with GIS data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, p. 1185-1194, 1997.

IM, J.; JENSEN, J. R.; TULLIS, J. A. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 2, p. 399-423, 2008.

IMHOFF, M. L.; MILNE, A. K.; SISK, T. D.; LAWRENCE, W. T.; BRENNAN, K. Mapping vegetation structure for biodiversity analysis using synthetic aperture radar. In: IGARSS '97. **Proceedings...** Singapore: IGARSS'97 Symposium, 1997.

IRION, G. Mineralogical and geochemical contribution to climatic history in central Amazonia during Quaternary time. **Tropical Ecology**, v. 23, p. 76-85, 1982.

IRION, G. Sedimentation and sediments of Amazonian rivers and evolution of the Amazonian landscape since Pliocene times. In: SIOLI, H. (ed). **The Amazon limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dordbrecht : Junk Publishers, 1984. p. 201-214.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment**: an earth resource perspective. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 592 p.

JORDAN, T. Retroarc Foreland and Related Basins. In: BUSBY, C.J.; INGERSOLL, R.V. (eds.). **Tectonics of sedimentary basins**. Cambridge: Blackwell Science, 1995. p. 331-362.

KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITES, J.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 339-358, 2004.

KLEIN, G. V. Intracratonic Basins. In: BUSBY, C.J.; INGERSOLL, R.V. (eds.). **Tectonics of Sedimentary Basins**. Cambridge: Blackwell Science, 1995. p. 459-478.

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

- LANG, S. Object-based image analysis for remote sensing applications: Modeling reality: Dealing with complexity. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G.J. (eds.) **Object based image analysis**. Heidelberg, Berlin, New York: Springer, 2008. p. 1-25.
- LANG, S.; TIEDE, D. Definiens developer. **GIS Business**, v. 9, p. 34-37, 2007.
- LATRUBESSE, E. M.; COZZUOL, M.; SILVA-CAMINHA, S. A. F.; RIGSBY, C. A.; ABSY, M. L.; JARAMILLO, C. The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. **Earth-Science Reviews**, v.99, p. 99-124, 2010.
- LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The holocene alluvial plain of the middle Amazon river, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 241-57, 2002.
- LILLESLAND; T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 6 ed. 756 p.
- LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 823-870, 2007.
- MAHESH, P.; MATHER, P. M. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 15, p. 554-565, 2003.
- MAIA, R. G.; GODOY, H. K.; YAMAGUTI, H. S.; MOURA, P. A.; COSTA, F. S. **Projeto carvão no Alto Amazonas: relatório final**. Rio de Janeiro: CPRM, 1977.
- MANTELLI, L. R. **Análise do modelo de elevação do terreno com base em dados SRTM na região de Breves, sudeste da Ilha do Marajó**. 143p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2008.
- MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. G.; VALERIANO, M. M. Applying SRTM digital elevation model to unravel Quaternary drainage in forested

areas of Northeastern Amazonia. **Computers & Geosciences**, v. 35, p. 2331-2337, 2009.

MARKHAM, A. J.; THORNE, C. R. Geomorphology of gravel-bed river bends. In: BILLI, P.; HEY, R. D.; THORNE, C. R.; TACCONI, P. (eds) **Dynamics of gravel bed rivers**. Chichester: Wiley, 1992. p. 433-450.

MARRIOTT, S. B. Analysis and modelling of overbank deposits. In: ANDERSON, M. A.; WALLING, D. E.; BATES, P. D. (eds) **Floodplain processes**. Chichester: Wiley, 1996. p. 63-93.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. London: Wiley, 2004. 324 p.

MCCAULEY, J. F.; BREED, C. S.; SCHABER, G. G.; MCHUGH, W. P.; ISSAWI, B.; HAYNES, C. V.; GROLIER, M. J.; EL KILANI, A. Paleodrainages of the eastern Sahara - the radar rivers revisited (SIR-A/B implications for a mid-Tertiary trans-African drainage system). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 24, p. 624-648, 1986.

MCCAULEY, J. F.; SCHABER, G. G.; BREED, C. S.; GROLIER, M. J.; HAYNES, C. V.; ISSAWI, B.; ELACHI, C.; BLOM, R. Subsurface valleys and geoarchaeology of the eastern Sahara revealed by shuttle radar. **Science**, v. 218, p. 1004-1020, 1982.

MCHUGH, W. P.; MCCAULEY, J. F.; HAYNES, C. V.; BREED, C. S.; SCHABER, G. G. Paleorivers and Geoarcheology in the Southern Egyptian Sahara. **Geoarcheology**, v. 3, p. 1-40, 1988.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. Brazilian Geology Part 1: the Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: AAPG, 1998. Short Course Notes.

MITRA, D.; TANGRI, A.; SINGH, I. B. Channel avulsions of the Sarda River system, Ganga Plain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 5, p. 929-936, 2005.

MUCHONEY, D.; BORAK, J.; CHI, H.; FRIEDL, M.; GOPAL, S.; HODGES, J.; MORROW, N.; STRAHLER, A. Application of the MODIS global supervised classification model to vegetation and land cover mapping of Central America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n.6 e 7, p. 1115-1138, 2000.

MUNHOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. Dissertação de Mestrado (mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2009. 112p.

NAVULUR, K. **Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

NORDBERG, M. L.; EVERTSON, J. Vegetation index differencing and linear regression for change detection in a Swedish mountain range using Landsat TM and ETM+ imagery. **Land Degradation & Development**, v. 16, p. 139-149, 2003.

PAILLOU, P.; SCHUSTER, M.; TOOTH, S.; FARR, T.; ROSENQVIST, A.; LOPEZ, S. Mapping of a major paleodrainage system in eastern Libya using orbital imaging radar: The Kufrah River. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 277, n. 3-4, p. 327-333, 2009.

PAL, N. R.; PAL, S. K. A review on image segmentation techniques. **Pattern Recognition**, v. 26, n. 9, p. 1277-1294, 1993.

PESSENDA, L. C. R.; BOULET, R.; ARAVENA, R.; ROSOLEN, V.; GOUVEIA, S. E. M.; RIBEIRO, A.S.; LAMOTTE, M. Origin and dynamics of soil organic matter and vegetation changes during the Holocene in a Forest-savanna transition zone, Brazilian Amazon region. **The Holocene**, v. 11, p. 250-254, 2001.

PESSENDA, L. C. R.; GOMES, B. M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A. S.; BOULET, R.; GOUVEIA, S.E.M. The carbon isotope Record in soils along a Forest-cerrado ecosystem transect: implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwester Brazilian Amazon region. **The Holocene**, v. 8, p. 599-603, 1998.

- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 144 p.
- POSAMENTIER, H. W.; WALKER, R. G. **Facies models revisited**. Tulsa: Society for Sedimentary Geology (SEPM), 2006. 527 p.
- PYE, K. **Sediment transport and depositional processes**. Blackwell. Oxford. 1994. 397p.
- QUINLAN, R. **C4.5: programs for machine learning**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. 316p.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.
- RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RadamBrasil**. Folhas SB-20; SC-19 e SC-20: geologia, geomorfologia, pedologia e vegetação. Rio de Janeiro: DNPM, 1978.
- RAMASAMY, S. N.; BAKLIWAL, P. C.; VERMA, R. P. Remote sensing and river migration in Western India. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2597-2609, 1991.
- ROSSETTI, D. F. Multiple remote sensing techniques as a tool for reconstructing late Quaternary drainage in the Amazon lowland. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 1234-1239, 2010.
- ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. **Catena**, v. 70, p. 253-265, 2007.
- ROSSETTI, D. F.; GOES, A. M. Late quaternary drainage dynamics in northern brazil based on the study of a large paleochannel from southwestern marajó island. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 3, p. 1-15, 2008.

- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M.; MIRANDA, A. C. C. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Sciences**, v. 23, p. 121-135, 2007.
- ROSSETTI, D. F.; TOLEDO, P. M.; GÓES, A. M. New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. **Quaternary Research**, v. 63, p. 78-89, 2005.
- ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M.; GOES, A. M.; THALES, M. Palaeodrainage on Marajó Island northern Brazil, in relation to Holocene sea-level dynamics. **The Holocene**, v. 18, n. 5, p. 1-12, 2008.
- ROSSETTI, D.; ALMEIDA, S.; AMARAL, D.; LIMA, C. M.; PESSENDA, L. Coexistence of forest and savanna in an Amazonian area from a geological perspective. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, n. 1, p. 120-132, 2010.
- SALOVAARA, K. J.; THESSLER, S.; MALIK, R. N.; TUOMISTO, H. Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM+ satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 39-51, 2005.
- SANO, E. E.; FERREIRA, L.; HUETE, A. R. Synthetic Aperture Radar (L band) and Optical Vegetation Indices for discriminating the Brazilian Savanna Physiognomies: A comparative Analysis. **Earth Interactions**, v. 9, n. 15, p. 1-15, 2005.
- SANTOS, J. R.; PARDI, M. S. L.; ARAUJO, L. S.; KEIL, M. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.7, p. 1217-1229, 2002.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. **Geo-Information-Systeme**, v. 6, p. 34-39, 2001.
- SCHUMM, S. A. Evolution and response of the fluvial system: Sedimentologic implications. **SEPM Special Publications**, v. 31, p. 19-29, 1981.
- SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: Wiley - Interscience, 1977. 388p.

SINHA, A. K. **Geoinformatics: data to knowledge**. Sioux Falls: Geological Society of America, 2006. 282 p.

SIOLI, H. Tropical river: the Amazon. In: WHITTON, B. A. (ed.). **River ecology**. Cambridge: Blackwell Science, 1975. p. 461-488.

SOUZA FILHO, P. W. M.; QUADROS, M. L. E. S.; SCANDOLARA, J. E.; FILHO, E. P. S.; REIS, M. R. Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 469-476, 1999.

STERNBERG, H. O. Vales tectônicos na planície amazônica? **Revista Brasileira de Geografia**, v. 12, n. 4, p. 511-531, 1950.

STROBL, J. Segmentation-based terrain classification. In: ZHOU, A.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in digital terrain analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. p. 125-139.

TRICART, J. L. F. Tipos de planícies aluviais e leitos fluviais na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, p. 3-38, 1977.

TRICART, J. L. F. Tipos de planícies aluviais e leitos fluviais na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, p. 3-38, 1977.

VALERIANO, M. M.; ROSSETI, D. F. TOPODATA: **Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2010. 73p.

VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.M.; STORINO, M.; AMARAL, B.D.; MENDES, J.N.; LIMA, B. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006.

VIDOTTO, E.; PESSENDA, L. C. R.; RIBEIRO, A. S.; FREITAS, H. A.; BENDASSOLLI, J. A. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do

Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. **Acta Amazônica**, v. 37, p. 385-400, 2007.

WOLMAN, M. G.; LEOPOLD, L. B. River floodplains: some observations on their formation. US Geological Survey Professional Paper, v. 282c, p. 87-107, 1957.

XIE, Y., SHA, Z.; YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. **Journal of Plant Ecology**, v. 1, n. 1, p. 9-23, 2008.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.

YASH PAL; SAHAI, B.; SOOD, R.K.; AGARWAL, D.P. Remote sensing of the lost Saraswati river. **Earth and Planetary Sciences**, v. 69, p. 317-331, 1980.