



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.03.13.16-TDI

**ANÁLISE DA IMPERMEABILIZAÇÃO DA ÁREA
URBANA DE MANAUS (1987-2006) COM O USO DO
MODELO DE MISTURA ESPECTRAL MESMA**

Tahisa Neitzel Kuck

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Diógenes Salas Alves, aprovada em 27 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3826LFS>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLISHED BY:

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 Staciarini 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:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.03.13.16-TDI

**ANÁLISE DA IMPERMEABILIZAÇÃO DA ÁREA
URBANA DE MANAUS (1987-2006) COM O USO DO
MODELO DE MISTURA ESPECTRAL MESMA**

Tahisa Neitzel Kuck

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Diógenes Salas Alves, aprovada em 27 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3826LFS>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Kuck, Tahisa Neitzel.

K952a Análise da impermeabilização da área urbana de Manaus (1987-2006) com o uso do modelo de mistura espectral MESMA / Tahisa Neitzel Kuck. – São José dos Campos : INPE, 2010. xxii+ 74 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.03.13.16-TDI)

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

Orientador : Dr. Diógenes Salas Alves.

1. Sensoriamento remoto. 2. Cobertura do solo urbano. 3. Landsat. 4. Bacia hidrográfica urbana. 5. V-I-S. I.Título.

CDU 528.88:528.46 (811.3)

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

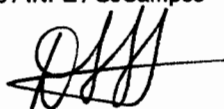
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dra. Cláudia Maria de Almeida



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Diógenes Salas Alves



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano



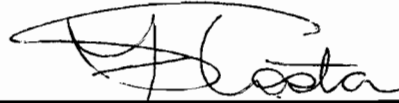
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Aluno (a): Tahisa Neitzel Kuck

São José dos Campos, 27 de agosto de 2010

“Tanta gente vive em circunstâncias infelizes e, contudo, não toma a iniciativa de mudar sua situação porque está condicionada a uma vida de segurança, conformismo e conservadorismo, tudo isso que parece dar paz de espírito, mas na realidade nada é mais maléfico para o espírito aventureiro do homem que um futuro seguro”.

*Chris McCandless (Alexander Supertramp), em carta enviada a Ron Franz
In to the Wild – Na natureza selvagem*

A meus filhos, Isabelle e Otto, minhas razões de viver...

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador, Dr. Diógenes S. Alves, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pela confiança.

A todos os professores do curso de Sensoriamento Remoto, em especial à Dra. Cláudia Maria de Almeida, Dr. José Carlos Neves Epiphany e Dr. Flávio Jorge Ponzoni, os quais considero exemplos de competência e dedicação ao trabalho.

Aos professores Camilo Daleles Rennó, Lênio Soares Galvão e Teresa Gallotti Florenzano, pelas excelentes contribuições no decorrer deste trabalho.

Ao Dr. Ari Marques de Oliveira, do INPA, e ao professor Carlos Eduardo Morelli Tucci, da UFRGS, por suas contribuições relativas ao tema “drenagem urbana”.

Ao Dr. Morton J. Canty, do Jülich Research Center – Alemanha, pelas dúvidas sanadas em relação à normalização radiométrica IR-MAD.

Aos amigos que fiz no INPE, em especial à Bárbara Maria G. Ribeiro, à Izabel Cristina dos Reis, que me apoiaram em momentos difíceis.

Ao colega de trabalho e grande amigo Edwin Keizer, pelas valiosas dicas, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos críticos.

Ao pessoal da coordenação do SERE, que tantas vezes me ajudou.

Ao INPE, pela grande oportunidade concedida a mim e por proporcionar todo o necessário para uma formação de excelência.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo apoio financeiro concedido através de bolsa.

À minha querida família, que sempre esteve ao meu lado e não me deixou desistir nos momentos mais difíceis.

Ao meu marido, por ter aberto mão de sua esposa por dois longos anos para que ela pudesse se dedicar aos estudos.

Aos meus pequeninos filhos, igualmente por terem abdicado da companhia de sua mãe enquanto ela só tinha tempo para a dissertação.

RESUMO

O acelerado processo de urbanização é um dos responsáveis por significativas alterações antropogênicas da paisagem natural. A compreensão e o monitoramento de tais alterações são fundamentais para o planejamento urbano, que visa o ordenamento do território e a contenção de impactos ambientais decorrente de novas ocupações. Um dos grandes problemas causados pelo adensamento populacional em grandes áreas urbanas é a impermeabilização indiscriminada do solo e o surgimento de novos assentamentos em áreas ambientalmente impróprias, o que tem trazido graves conseqüências para a população, dentre as quais, o aumento, em magnitude e freqüência, das enchentes urbanas. Para evitar tais problemas, as microbacias hidrográficas urbanas devem constituir o domínio físico de planejamento, e para tal, sua ocupação deve ser estudada. Neste aspecto, os produtos do sensoriamento remoto orbital demonstram-se úteis por subsidiarem a geração de diversas informações históricas e atuais e uma visão sinóptica da área analisada. O objetivo deste trabalho foi delimitar as frações de superfícies impermeáveis da cidade de Manaus, Amazonas, nos anos de 1987 e 2006, através da aplicação da técnica de Modelo de Mistura Espectral com Múltiplas Componentes (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis – MESMA*; ROBERTS et al., 1998) em imagens *Landsat Thematic Mapper (TM)*. Foi apresentada uma metodologia de seleção de espectros para compor uma única biblioteca espectral a ser utilizada para modelar as duas datas analisadas, resultando em frações de vegetação, solo e superfícies impermeáveis. Ao todo, foram selecionados 30 espectros para os modelos de 2 e 3 componentes e 18 para os de 4 componentes, os quais modelaram 97,7% da imagem de 2006 e 99,2% dos espectros da imagem de 1987 com 2,5% de limiar de aceitação de erro (RMS). Ao final, foram gerados os mapas de frações com o valor de cada pixel representando a porcentagem de determinada componente presente neste pixel. A partir do mapa de frações de superfícies impermeáveis, discutiu-se a respeito do processo de expansão urbana e conseqüente impermeabilização do solo em Manaus, no contexto dos problemas ambientais relacionados à ambientes urbanos. A delimitação da bacia hidrográfica do São Raimundo, a qual concentra mais da metade da população urbana de Manaus (IBGE, 2007), e de suas microbacias foi realizada através de um Modelo Digital de Elevação. A partir dessa delimitação, foram calculadas as declividades médias e as porcentagens de superfície impermeável para cada uma das microbacias. Os valores obtidos para declividade e taxa de impermeabilização foram cruzados, e as microbacias categorizadas segundo seu nível de escoamento superficial em “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”. O mapa contendo as microbacias categorizadas e sua sobreposição com os limites políticos estabelecidos no Plano Diretor Urbano e Ambiental de Manaus originou uma discussão acerca da configuração da ocupação em relação às microbacias urbanas. Este estudo demonstrou o potencial das imagens de moderada resolução espacial e dos modelos de mistura baseados em múltiplas componentes para a análise da problemática ambiental urbana relacionada à impermeabilização do solo.

**ANALYSIS OF THE IMPERVIOUSNESS PROCESS OF MANAUS URBAN
AREA (1987-2006) BY *MESMA* SPECTRAL MIXTURE MODEL**

ABSTRACT

The accelerated process of urbanization is responsible for significant anthropogenic alterations of natural landscapes. The understanding and monitoring of these changes are fundamental for urban planning which envisions the spatial planning and the contention of environmental impacts resulting from occupation of new areas. One of the significant problems of increasing population densities in large urban areas is the invariable impermeabilization capacity of the soil and the arising of new settlements in inappropriate fragile environments. These processes have brought harsh consequences on the population, of which, the increase in magnitude and frequency of urban flooding. To avoid such problems, the physical domain of planning should be oriented towards the micro watershed level within urban landscapes in which the occupation should be analysed. Remote sensing delivers a series of tools and products suitable for the development of a variety of up-to-date and historical information at a synoptic view to be analysed within this context. The objective of this research is to delimit the fractions of impermeable surfaces within the city of Manaus, Amazonas State, Brazil, between the years 1987 and 2006 based on the application of *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA)*; ROBERTS et al., 1998, on a series of Landsat Thematic Mapper (TM) imagery. The presented methodology exists of the selection of spectra to compose a unique spectral library for the modeling of vegetation, soil, impermeable surface and shadow fractions for the two analyzed dates. In total, 30 sample spectra were selected for the modeling of 2 and 3 endmembers e 18 sample spectra for the 4 endmembers, of which 97.7% was correctly modeled for the 2006 image and 99.2% for the 1987 image with a root mean squared (RMS) error of 2.5 %. Finally, fraction maps were generated with each of the pixels representing a percentage of the determined endmember present within the pixel. The fraction maps of impermeable surface are discussed in relation to the urban expansion process and the consequences of soil impermeabilization within the city of Manaus and in the context of environmental issues within urban environments. The São Raimundo watershed within Manaus concentrates more than half of the urban population (IBGE, 2007). The watershed and sub watershed boundaries for the São Raimundo watershed were generated on the basis of the digital elevation model (DEM). On the basis of this delineation, average declivity and percentages of soil impermeability were calculated for each of the micro basins. The obtained values for declivity and the rate of impermeabilization were related to categorize the micro watersheds on the basis of their level of surface runoff into the classes “very low”, “low”, “high” and “very high”. The map of categorized micro basins and its overlay on the political boundaries established within the Urban Master Plan of Manaus originates a discussion on the configuration of occupation in relation to urban micro watersheds. This study demonstrates the potential of satellite images of moderate spatial resolution and the mixture models based on multiple endmembers for the analysis of urban environmental problems related to soil impermeabilization.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 – Esquema conceitual dos impactos nos processos hidrológicos da urbanização.....	7
Figura 2.2 – Diagramas de dispersão bidimensionais compostos por componentes da MNF;	14
Figura 3.1 – Fluxograma compreendendo as principais etapas metodológicas.	23
Figura 3.2 – Área de estudo – área urbana de Manaus (projeção UTM, zona 20 S).....	24
Figura 3.3 – Imagens Landsat TM (composição R5 G4 B3) da área de estudo, ano 2006, contendo a delimitação das duas bacias urbanas de maior densidade ocupacional e os igarapés contribuintes destas.	27
Figura 3.4 – Igarapé do Mindu, o principal igarapé da bacia do São Raimundo, em dois momentos: (a) dia seco, em seu curso normal; (b) após um evento de chuva intensa (ano 2007), transbordado.	28
Figura 3.5 – Fluxograma metodológico de seleção das componentes para compor a biblioteca espectral final do MESMA. MNF 1, MNF 2 e MNF 3: primeira, segunda e terceira componentes resultantes da aplicação da transformação Minimum Noise Fraction, respectivamente.	33
Figura 3.6 – Fluxograma metodológico de delimitação das microbacias e qualificação das mesmas em 5 classes , segundo seus níveis de impermeabilização e declividade...	39
Figura 4.1 – Imagens Landsat TM (composição R5 G4 B3) da área de estudo, dos anos de (a)1987, (b) 2001 e (c) 2006, e (d) máscara de corpos d’água, nuvens e sombras de nuvens.....	41
Figura 4.2 – Espectros selecionados para compor a primeira biblioteca espectral do MESMA.	42
Figura 4.3 – Espectros selecionados para compor a biblioteca espectral final do MESMA.	43
Figura 4.4 – Imagens fração geradas a partir da aplicação do MESMA.	45

Figura 4.5 – Fração de superfície impermeável em (a)1987 e (b) 2006, com os pontos indicando as centralidades urbanas e a delimitação das duas principais bacias hidrográficas urbanas e da Reserva Floresta Adolpho Ducke.....	49
Figura 4.6 – Subdivisão da bacia hidrográfica do São Raimundo em microbacias.	51
Figura 4.7 – Níveis de escoamento superficial obtidos a partir do cruzamento da porcentagem de impermeabilização em 1987 e 2006 com a declividade média, em cada microbacia.	52
Figura 4.8 – Delimitação das Macrounidades e Unidades de Estruturação Urbana (UES), sobreposta às microbacias da bacia hidrográfica do São Raimundo categorizadas segundo a figura 15 (níveis de escoamento superficial – 2006).....	54
Figura 4.9 – Recortes em imagens de alta resolução espacial demonstrando diferentes taxas de impermeabilização dos lotes na área urbana das cidades de São Paulo-SP, Belo Horizonte-MG e Manaus-AM, com prováveis limites de lotes circulados em amarelo, exemplificando a relação entre tamanho do lote e taxa de impermeabilização.....	56
Figura 4.10 – Mapa dos Índices de Desenvolvimento Humano de Manaus, com áreas críticas, ou seja, que apresentaram níveis de escoamento superficial “altos” e “muito altos”, circuladas em azul.	57

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Características do sensor Landsat/TM.....	21
Tabela 3.1 – Cruzamento dos intervalos obtidos para superfícies impermeáveis e declividade média, gerando 5 níveis de escoamento superficial.	40
Tabela 4.1 – Combinações entre componentes utilizadas nos modelos aplicados (vs: vegetação seca; vv: vegetação verde; imp: superfícies impermeáveis).....	44
Tabela 4.2 – Quantidade de pixels, exceto máscara de água, modelados através dos modelos com 2, 3 e 4 componentes (tabela 2) nas imagens de 1987, 2001 e 2006.	44
Tabela 4.3 – Matrizes de confusão entre as componentes dominantes da imagem referência e as componentes dominantes da imagem modelada.	46
Tabela 4.4 – Matrizes de confusão entre as frações de cobertura da imagem referência e as frações de cobertura da imagem modelada.	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEIS	Área de Especial Interesse Social
COB	<i>Count-based Endmember Selection</i>
EAR	<i>Endmember Average RMSE</i>
EG	Exatidão Global
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR-MAD	<i>Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection</i>
IVM	Infravermelho Médio
IVP	Infravermelho Próximo
IVT	Infravermelho Termal
MASA	<i>Minimum Average Spectral Angle</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MESMA	<i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MODTRAN	<i>Moderate Resolution Transmission Model</i>
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
SAM	<i>Spectral Angle Mapper</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UES	Unidade de Estruturação urbana
VIPER	<i>Visualization and Image Processing for Environmental Research</i>
V-I-S	<i>Vegetation-Impervious Surface-Soil</i>
WCM	<i>Water Column Multiplier</i>
WR	<i>Water Retrieval</i>
WRS	<i>Worldwide Reference System</i>

SUMÁRIO

Pág.

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral.....	3
1.2. Objetivos Específicos.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Urbanização e aspectos ambientais.....	5
2.2. Sensoriamento remoto aplicado à análise urbana	8
2.3. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)	10
2.4. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (MESMA).....	15
2.5. O VIPER Tools para a Análise de Mistura Espectral	16
2.6. Estudos Multitemporais de áreas urbanas	19
2.7. Imagens Landsat-5/TM	21
2.8. Imagens QuickBird e IKONOS	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Área de estudo.....	24
3.2. Imagens utilizadas.....	28
3.3. Pré processamento das imagens	29
3.4. Modelo de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes.....	31
3.5. Avaliação dos Resultados	36
3.6. Análise do processo de impermeabilização na bacia hidrográfica urbana do São Raimundo	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Aplicação do MESMA	41
4.2. O processo de expansão urbana em Manaus.....	48
4.3. Análise da impermeabilização na bacia hidrográfica urbana do São Raimundo nos anos 1987 e 2006	51
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A – Tabela de valores do lote por bairro em Manaus	71
ANEXO B – Anexo III da Lei no 672/2202 do Plano Diretor Urbano e Ambiental de Manaus	73

1. INTRODUÇÃO

O rápido processo de urbanização ocorrido nas últimas décadas tem sido a causa de diversos problemas ambientais urbanos ocasionados em função das alterações na ecologia dessas áreas. Dentre outros, os impactos hidrológicos são os mais comumente observados, enquadrando-se nestes a poluição dos cursos d'água, processos erosivos e enchentes, causados, dentre outros, pela supressão da cobertura vegetal e sua substituição por superfícies impermeáveis (PAUL e MEYER, 2001; WENG, 2001).

Em Manaus, alvo deste estudo, os resultados desse processo não foram menos impactantes. A capital do Amazonas, hoje com aproximadamente 1,6 milhões de habitantes (IBGE, 2007), apesar de inserida na floresta amazônica é cenário de devastação dos recursos naturais, ocasionada pelas ocupações espontâneas (invasões) totalmente desprovidas de infra-estrutura e em áreas de risco ambiental. Em maior ou menor grau, todos os igarapés intraurbanos estão poluídos e pelo menos dez bairros encontram-se em áreas sujeitas a alagamento nos picos de chuvas intensas (CPRM, 2008).

A compreensão e o monitoramento das mudanças na cobertura do solo ocasionadas pela urbanização são fundamentais para as atividades de planejamento urbano, administração dos serviços básicos de saneamento e infra-estrutura, alocação da oferta de serviços, dentre outras medidas que buscam a minimização e mitigação dos impactos ocasionados (JAT et al., 2008).

As técnicas convencionais de aquisição de informações bio-físicas sobre o território urbano, as quais baseiam-se em levantamentos *in-loco*, são onerosas temporal e financeiramente e capazes apenas de prover dados pontuais e relativos a um período de aquisição específicos. Como alternativa, o sensoriamento remoto constitui um instrumento importante para pesquisas urbanas (GOMARASCA et al., 1993; GREEN et al. 1994; YEH e LI, 2001; YANG e LO, 2003; HAACK e RAFTER, 2006) por possibilitar uma visão sinóptica do território e a aquisição de séries temporais de dados.

Diversos estudos utilizando imagens multitemporais têm sido realizados para monitorar e compreender o fenômeno de expansão urbana (TANG et al., 2008; JAT et al., 2008). Estes se baseiam tanto na comparação entre imagens como na comparação entre resultados de processamentos destas.

As técnicas de processamento de imagens visam extrair informações muitas vezes não visíveis numa simples análise visual de imagens. A identificação visual é especialmente dificultada quando tratamos de imagens de resolução espacial moderada, nas quais cada pixel pode representar a mistura espectral de n componentes da cobertura do solo dentro do campo de visada do sensor. Em áreas urbanas, devido à heterogeneidade espectral, tal mistura é ainda maior (SMALL, 2005), pois de uma forma geral, cada pixel pode representar uma mistura de diversos materiais e práticas construtivas com respostas espectrais distintas (POWELL et al., 2007).

Uma das soluções de processamento empregada para solucionar essa limitação é a aplicação dos modelos de mistura espectral (ADAMS et al., 1993), os quais buscam estimar as frações de contribuição de cada tipo de cobertura do solo, caracterizando o ambiente urbano em termos de suas componentes físicas (POWELL et al., 2007). Áreas urbanas geralmente podem ser decompostas em três componentes além da água: superfícies impermeáveis, solo e vegetação (RIDD, 1995).

Enquanto os modelos de mistura espectral procuram modelar a resposta espectral de todos os pixels da imagem de acordo com um número fixo de componentes (ou *endmembers*), uma adaptação, denominada Modelo de Mistura Espectral com Múltiplas Componentes (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis - MESMA*) (ROBERTS et al., 1998), possibilita a incorporação da variabilidade espectral de determinada componente através da variação do número e tipo de componente para modelar cada pixel.

As problemáticas abordadas neste trabalho foram as seguintes: é possível utilizar uma única biblioteca espectral para modelar imagens de uma mesma área, porém de diferentes datas? É possível identificar e quantificar a superfície impermeável de áreas urbanas a partir dos dados de saída na aplicação de um modelo de mistura espectral

sobre imagens de moderada resolução espacial, que consistem nas frações de componentes em nível de sub-pixel? A partir da fração de superfícies impermeáveis extraída de diferentes datas, pode-se visualizar a direção da expansão urbana? É possível gerar uma escala qualitativa de velocidade de escoamento superficial através da fração de superfícies impermeáveis, para cada microbacia, que dê um indicativo de quais áreas necessitam intervenção a fim de conter o processo de ocupação e conseqüente impermeabilização do solo?

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade de análise do processo de impermeabilização na área urbana de Manaus, Amazonas através das frações resultantes da aplicação de um modelo de mistura espectral baseado em múltiplas componentes sobre imagens multitemporais de moderada resolução espacial.

1.2. Objetivos Específicos

Este trabalho teve como objetivos específicos:

- a) Avaliar a possibilidade de modelar imagens de diferentes datas através de uma única biblioteca espectral contendo espectros coletados em apenas uma das imagens, denominada referência;
- b) Avaliar a aplicabilidade da fração de superfícies impermeáveis da análise da expansão urbana e configuração da ocupação;
- c) Verificar a possibilidade de análise qualitativa de níveis de escoamento superficial nas microbacias da bacia hidrográfica do São Raimundo através da fração de superfícies impermeáveis e dos dados de declividade, identificando as áreas prioritárias à intervenção no sentido de conter ou até mesmo reverter o processo de ocupação e conseqüente impermeabilização do solo;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Urbanização e aspectos ambientais

A urbanização, junto com a atividade de agricultura e o desmatamento, forma o grupo responsável pelas alterações antropogênicas mais significativas na cobertura do solo (YANG e LO, 2003).

A acelerada concentração populacional em grande escala nas áreas urbanas é um processo relativamente recente. Segundo dados da United Nations (2007), em 1950 apenas 29,1% da população mundial habitava em áreas urbanas. Já em 2005 esse número cresceu para 48,6% e segundo estimativas, em 2050 deve ultrapassar 69%. Esse processo ocorreu de forma ainda mais rápida no caso América do Sul, que possui o maior ritmo de crescimento entre os continentes. Em 1950, 36,2% da população já se concentrava em áreas urbanas. Em 2005 este número cresceu para 84,2% e segundo estimativas, deve atingir 93,6% por volta de 2050 (UNITED NATIONS, 2007).

Na América do Sul, a rápida urbanização ocorre tipicamente em um cenário de lento desenvolvimento econômico e desigual distribuição de renda, o que acarreta um incremento da ocupação irregular e periferização (TUCCI e BERTONI, 2003). Para que o crescimento urbano ocorra de forma ordenada, atendendo às demandas da população sem causar graves conseqüências ao meio ambiente, faz-se necessário planejar o espaço, antecipando-se à ocorrência de assentamentos espontâneos.

As áreas periféricas, por não serem dotadas de infra-estrutura, são muitas vezes a opção menos onerosa de ocupação. Porém, geralmente é nessas áreas que se encontram as nascentes, consideradas pelo Código Ambiental do Município de Manaus (Prefeitura Municipal de Manaus, 2001) como áreas de preservação permanente, devendo ser, portanto, protegidas. Em função da pressão demográfica e da negligência das instituições reguladoras, tais áreas acabam por perder a cobertura vegetal, transformando-se em novas ocupações.

Já as áreas centrais geralmente representam alvos de especulação imobiliária, estando sujeitas às ocupações de alta densidade – como verticalizações, independente do fato de estarem ou não localizadas em áreas de preservação permanente. Ou seja, o espaço urbano dotado de infra-estrutura é caro, e na concepção do mercado imobiliário, deve ser aproveitado ao máximo (NUCCI, 2008).

Todos os fatores citados, em conjunto, contribuem para o surgimento de problemas de cunho ambiental, que afetam diretamente a população local. Entre estes podemos citar o desmatamento, a fragmentação florestal, a impermeabilização indiscriminada do solo e problemas hidrológicos como poluição dos cursos d'água e enchentes (HURD et al., 2001).

A cobertura vegetal interfere no processo precipitação-vazão, reduzindo as vazões máximas, devido ao amortecimento do escoamento. Além disso, evita a erosão do solo, fenômeno que pode aumentar o nível dos rios gradualmente, devido à deposição de sedimentos, e agravando as inundações (TUCCI e BERTONI, 2003).

O incremento da porção de superfície impermeável nas bacias hidrográficas, que ocorre através da construção de edificações, estradas pavimentadas, etc., é um dos principais fatores contribuintes para o aumento, em frequência e magnitude, das inundações urbanas, uma vez que altera o funcionamento do ciclo hidrológico (figura 2.1). Na medida em que a população impermeabiliza o solo e acelera-se o escoamento da água através de condutos e canais, a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta, produzindo inundações mais frequentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural (TUCCI e BERTONI, 2003).

Considerando-se, por sua vez, o processo de infiltração, sua redução tende a diminuir o nível do lençol freático por falta de alimentação (principalmente quando a área urbana é muito extensa), reduzindo o escoamento subterrâneo.

Outro efeito direto da impermeabilização do solo é o da alteração no balanço de radiação com aumento da temperatura ambiente. As superfícies impermeáveis absorvem

parte da energia solar, produzindo ilhas de calor na parte central dos centros urbanos, onde predomina o concreto e o asfalto. O aumento da absorção de radiação solar aumenta a emissão de radiação térmica de volta para o ambiente, gerando calor. O aumento de temperatura também cria condições de movimento de ar ascendente que pode gerar processos de precipitação mais intensos (TUCCI e BERTONI, 2003). Silveira (1997) mostra que a parte central de Porto Alegre apresenta maior índice pluviométrico que sua periferia, atribuindo essa tendência à urbanização.

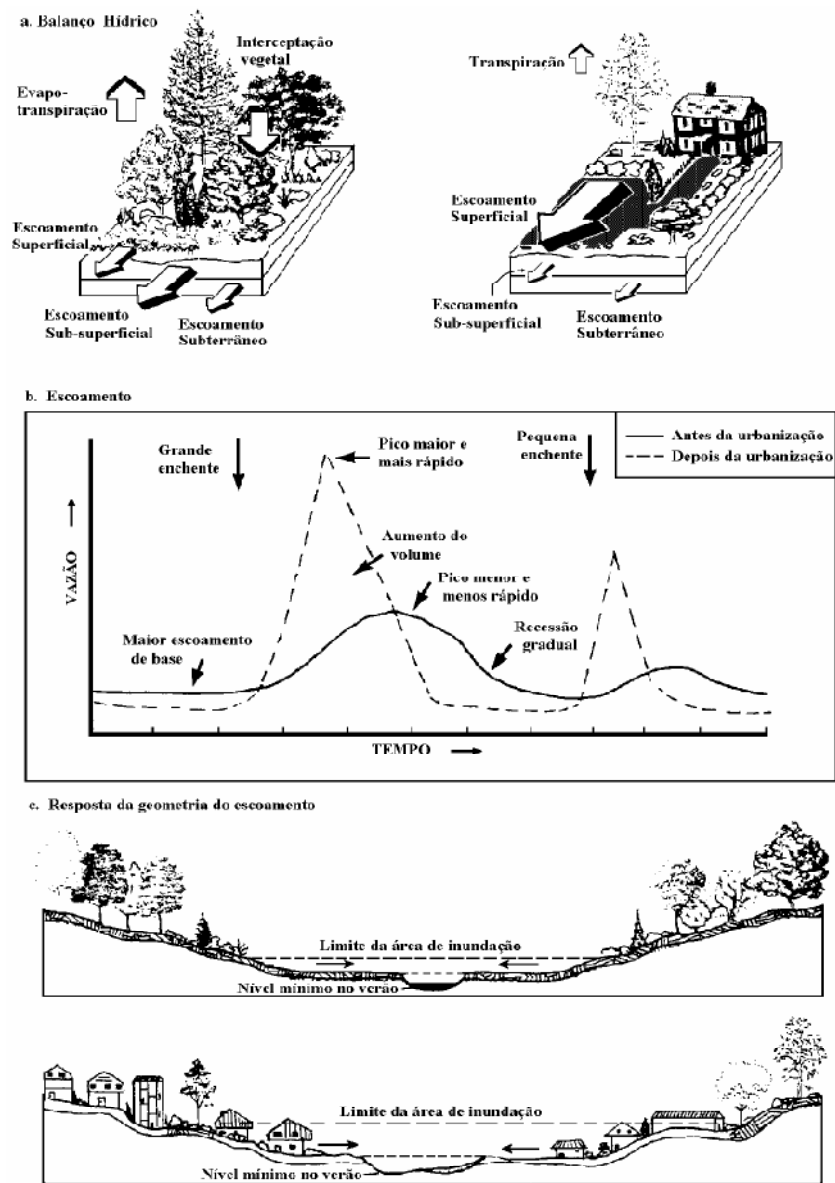


Figura 2.1 – Esquema conceitual dos impactos nos processos hidrológicos da urbanização.
 Fonte: Schueler, 1987

Através da Resolução nº 25, de 18 de março de 2005, o Ministério das Cidades instituiu um prazo (outubro de 2006) para que todos os municípios com mais de 20000 habitantes elaborassem seu Plano Diretor Urbano e Ambiental, conforme Lei Federal 10.257/01 (Estatuto da Cidade), o qual possui como complemento o Plano Diretor de Drenagem Urbana, que segundo orientações do Ministério das Cidades, deve ser elaborado considerando a bacia hidrográfica como um todo, e não em trechos isolados, ou seja, a bacia hidrográfica deve ser o domínio físico de avaliação dos impactos resultantes de novos empreendimentos, visto que a água não respeita limites políticos (Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2005).

Porém, segundo apontado por Tucci e Bertoni (2003) os órgãos públicos responsáveis pelo monitoramento e controle de drenagem urbana não têm considerado a bacia hidrográfica como um sistema de controle, planejando com base no princípio de que a melhor drenagem é a que retira a água excedente o mais rapidamente possível do seu local de origem, ou seja, apenas transferindo para outro ponto os impactos gerados em determinado local da bacia hidrográfica através de condutos e canalizações.

Portanto, o levantamento dos aspectos bio-físicos das bacias hidrográficas intraurbanas, considerando-a como um todo e não em partes, faz-se necessário para que a atividade de planejamento de assentamentos e infra-estrutura seja bem sucedida.

2.2. Sensoriamento remoto aplicado à análise urbana

Para as esferas de planejamento municipal, o monitoramento e diagnóstico do processo de urbanização são procedimentos essenciais no tocante à administração dos recursos de água e esgoto, uso e ocupação do solo e locação de serviços. Porém, ainda são poucas as cidades brasileiras que possuem informações espacializadas sobre sua ocupação e as técnicas convencionais de mapeamento do território são onerosas financeira e temporalmente (JAT et al., 2008).

Nesse aspecto, as imagens de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para diagnóstico e monitoramento urbanos, por subsidiarem a geração de diversos dados históricos e atuais e uma visão sinóptica da cobertura do solo, e pesquisas envolvendo

sua utilização para detecção das mudanças urbanas têm sido objeto de diversos trabalhos (GOMARASCA et al., 1993; GREEN et al. 1994; YEH e LI, 2001; YANG e LO, 2003; HAACK e RAFTER, 2006).

Diversos sensores estão sendo utilizados para caracterizar e monitorar áreas urbanas, em que a cobertura da terra e as feições de interesse geralmente exigem a utilização de imagens de alta resolução espacial (HEROLD et al., 2003; SMALL, 2003). Porém, o alto custo dessas imagens dificulta o monitoramento freqüente de mudanças de tais áreas. Como alternativa tem-se utilizado imagens de resolução espacial moderada (10 a 30 m) (WU, 2004; SMALL e LU, 2006), dentre as quais destacam-se aquelas dos sensores MSS e TM dos satélites Landsat, por possuírem vasta série de dados multitemporais e grande conjunto de técnicas de análise.

De um modo geral, os sensores orbitais e aerotransportados provêm dados para a caracterização do uso e cobertura do solo através do registro da interação entre a radiação eletromagnética e os alvos da superfície terrestre (JENSEN, 2007). Após adquiridos pelos sensores e enviados às estações terrestres, os produtos de sensoriamento remoto são processados para que possam ser utilizados pelo usuário final. Diversas são as técnicas utilizadas para extrair informações das imagens, as quais, em sua maioria, baseiam-se na identificação de padrões espectrais dos alvos.

Dentre as aplicações mais comuns do sensoriamento remoto em estudos urbanos destaca-se a análise multitemporal para detecção de alterações de uso e cobertura do solo (HURD et al., 2001; YEH e LI, 2001; LO e YANG, 2002; YANG e LO, 2003; MUNDIA e ANIYA, 2005; JAT et al., 2008) Em geral, tal análise baseia-se na comparação, entre datas, dos resultados pós-classificação de imagens, método que facilita a identificação e localização das mudanças (TANG et al., 2008).

Os métodos de classificação de imagens de sensoriamento remoto mais comumente utilizados assumem que em cada pixel da imagem ocorre uma única classe de cobertura da terra (WU, 2004). Porém, considerando-se a complexidade da composição urbana e, ainda, que o sinal registrado pelo sensor compreende a combinação das respostas espectrais dos diversos materiais dentro de cada pixel (DENNISON e ROBERTS,

2003), o pressuposto de uma classe em cada pixel de média resolução espacial pode iludir importantes informações sobre a variabilidade de composição.

Uma alternativa é o mapeamento do ambiente urbano buscando representações de suas componentes físicas, que tenderiam a preservar a heterogeneidade de cobertura da terra (JI e JENSEN, 1999; CLAPHAM, 2003), caracterizar tal cobertura sem interferência de definições impostas pelo analista (RIDD, 1995) e capturar com mais acurácia as alterações da paisagem ao longo do tempo (JI e JENSEN, 1999; RASHED et al., 2005).

Segundo Powell (2007), apesar de diversos autores utilizarem tais componentes como dados de entrada para os métodos tradicionais de classificação da cobertura da terra, transformando-os em classes de uso exclusivas, outros se propõem a mapear as frações de cobertura de cada um desses componentes dentro de um mesmo pixel através de diversas metodologias.

Uma das metodologias que vem sendo bastante explorada é o mapeamento sub-pixel dos componentes que cobrem o solo urbano através dos Modelos de Mistura Espectral (POWELL et al., 2007), os quais consideram o espectro de cada pixel como a combinação das respostas de componentes puras (*endmembers*) dentro do IFOV (*Instantaneous Field of View*) do sensor (ADAMS et al., 1993; ROBERTS et al., 1998).

2.3. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

O valor associado a cada pixel de um canal espectral de uma imagem é resultante da radiância média dos materiais encontrados na superfície em uma determinada faixa espectral, acrescentada à dos processos de interferência atmosférica (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). O sinal registrado pelo sensor depende das características do sensor, da composição físico-química dos materiais presentes no pixel e da interferência atmosférica.

A geração do sinal espectral de um pixel na faixa do ótico não preserva a heterogeneidade de alvos presentes em um mesmo IFOV, aumentando os erros nas análises quantitativas dos dados gerados a partir da aplicação das técnicas

convencionais de classificação digital de imagens orbitais, uma vez que seus resultados resumem-se a apenas uma possibilidade de classe para cada pixel.

Os modelos de análise de mistura espectral (do inglês *Spectral Mixture Analysis - SMA*) são utilizados para estimar a fração de contribuição de determinado componente puro (*endmember*) na resposta espectral de um pixel (ADAMS et al., 1993; ROBERTS et al., 1998).

Esses modelos podem ser classificados em lineares (Modelo Linear de Mistura Espectral – MLME) ou não lineares, de acordo com a complexidade do espalhamento. Se dentro de um campo de visada cada fóton interage com um único tipo de cobertura do solo, então a mistura é dita linear e o espectro pode ser modelado como a soma do espectro de cada tipo de cobertura multiplicado pela fração ocupada por tal dentro do IFOV (ADAMS et al., 1995; ROBERTS et al., 1998).

Para a maioria das aplicações urbanas, o espalhamento pode ser considerado linear (SMALL, 2001; 2002; PHINN et al., 2002), e a reflectância ρ'_λ de um pixel i é dada por:

$$\rho'_\lambda = \sum_{i=1}^N f_i * \rho_{i\lambda} + \varepsilon_\lambda \quad \text{para} \quad \sum_{i=1}^N f_i = 1 \quad , \quad (1)$$

em que $\rho_{i\lambda}$ é a reflectância da componente i em uma banda específica (λ), f_i é a fração da componente, N é o número de componentes e ε_λ é o erro residual. O ajuste do modelo é avaliado através do cálculo do erro médio quadrático (RMSE – *Root Mean Squared Error*) dos resíduos de cada pixel em todas as bandas (ADAMS et al., 1993; ROBERTS et al., 1998), dado por:

$$RMSE = \left(\sum_{k=1}^{\lambda} (\varepsilon_{i\lambda})^2 / N \right)^{1/2} \quad (2)$$

A aplicação do algoritmo de mistura resulta em tantas imagens quantas forem as componentes puras utilizadas pelo modelo. O número de componentes em um modelo

de mistura pode ser de no mínimo dois e no máximo igual ao número de bandas espectrais utilizadas (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Nos modelos de mistura é possível gerar imagens-erro, as quais permitem avaliar os resultados. A proporção relativa de cada elemento em um modelo de mistura varia de acordo com a área considerada.

No caso específico do modelo desenvolvido por Shimabukuro & Smith (1991), cada pixel da imagem é decomposto em frações de solo, sombra e vegetação. Ridd (1995) propõe que qualquer ambiente urbano pode ser caracterizado através de três componentes físicos primários além da água, sendo estes, vegetação, superfícies impermeáveis e solo (*Vegetation-Impervious Surface-Soil* (V-I-S)), adicionado à sombra/ corpos d'água. Estudos como de Wu e Murray (2003), Rashed et al. (2003) e Wu (2004) utilizam o modelo baseado nas frações V-I-S para a discriminação sub-pixel das componentes de áreas urbanas.

Small (2003) aplicou os Modelos de Mistura Espectral em imagens multiespectrais do sensor IKONOS para quantificar e comparar as propriedades de reflectância entre áreas urbanas de diversas regiões do mundo, uma vez que o produto deste sensor é o resultado de uma grande mistura de diferentes alvos em uma representação limitada à sua capacidade de discriminação.

Os MLMEs foram também utilizados por Small e Lu (2006) para a elaboração de um procedimento operacional de estimativa de fração de vegetação em áreas urbanas a partir de imagens de resolução moderada e por Wu e Murray (2003) para estimativa de fração de superfícies urbanas impermeáveis.

A seleção de componentes que sejam realmente representativas dos alvos da paisagem urbana é fundamental para a obtenção de bons resultados na aplicação dos modelos de mistura (TOMPKINS et al., 1997; DENNISON e ROBERTS, 2003a).

Na terminologia utilizada por Gillespie et al. (1990) e Adams et al. (1993), as componentes podem ser derivados da imagem (componentes da imagem) ou derivados de espectros coletados em campo ou laboratório (componentes de referência). A

interferência da atmosfera no imageamento através de sensores orbitais (SETTLE e DRAKE, 1993) muitas vezes dificulta ou até impossibilita a utilização das componentes de referência, os quais estão isentos de tais efeitos (TOMPKINS et al., 1997). Porém, estudos recentes demonstram que tal problema pode ser superado com a utilização das componentes da imagem, os quais representam a mistura dos espectros dos alvos com os efeitos de absorção e espalhamento atmosférico (SMITH et al., 1990; ADAMS et al., 1995).

A transformação por Componentes Principais é um método amplamente empregado para auxiliar na seleção de componentes da imagem, por minimizar a influência da correlação entre bandas nas análises (SMITH et al., 1985). A utilização de diagramas de dispersão das diversas combinações entre pares de principais componentes pode facilitar na identificação visual dos espectros extremos, que representam os componentes da cobertura do solo (SMALL e LU, 2006).

A transformação MNF (Minimum Noise Fraction) é uma variação da transformação por Componentes Principais, com a vantagem de produzir componentes/bandas ordenados pela qualidade (relação sinal-ruído) da imagem. Essencialmente, a transformação MNF segue duas transformações em cascata, sendo que a primeira transformação se baseia em uma matriz de covariância estimada de ruído para remover a correlação interbandas e re-escalonar o ruído. Esta transformação resulta em um conjunto de bandas caracterizadas por variâncias iguais. A segunda transformação consiste na transformação padrão por Componentes Principais dos dados, resultando em um novo conjunto de bandas que é ordenado segundo os autovalores (eigenvalues) que expressam a variância das bandas. A ordem crescente das componentes implica em aumento do nível de ruído, indicado pela menor variância (GREEN et al., 1988). À semelhança do que ocorre quando se aplica uma transformação por Componentes Principais, a(s) última(s) componente(s)¹ podem ser, dependendo do objetivo da análise, descartadas, pois são elas que concentram o ruído. A transformação MNF se aplica a dados multiespectrais e hiperespectrais.

¹ Neste caso, o termo “componentes” refere-se às bandas geradas a partir da aplicação da transformação por Componentes Principais, e não a *endmembers*.

Wu e Murray (2003) e Small (2003) utilizaram tal abordagem na seleção de componentes para a aplicação de MLME em áreas urbanas (Figura 2.2).

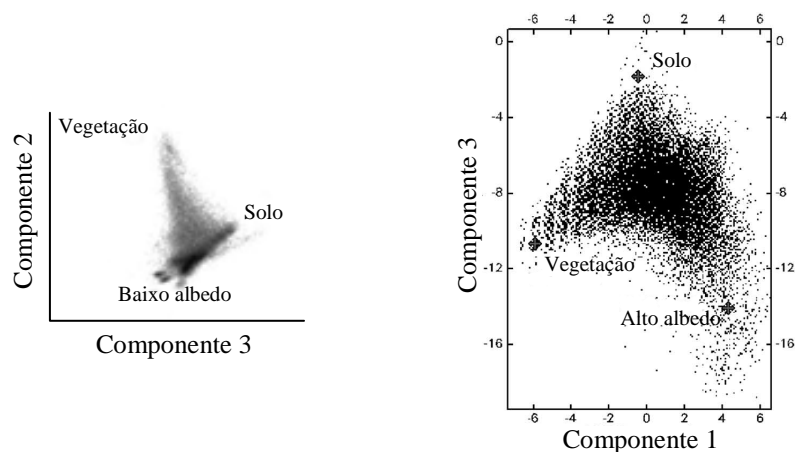


Figura 1.2 – Diagramas de dispersão bidimensionais compostos por componentes da MNF;
Fonte: (a) adaptado de Small (2003); (b) adaptado de Wu e Murray (2003).

Através da aplicação do PPI (*Pixel Purity Index*) é possível realizar a identificação de pixels extremos nas componentes da MNF de maneira menos empírica e mais dinâmica do que através da seleção visual. O PPI consiste na repetição da projeção dos diagramas de dispersão n -dimensionais sobre um vetor unitário aleatório. Em cada projeção são computados os pixels das extremidades do vetor, que se encontram dentro de um limiar estabelecido. A definição de pureza ou não-pureza depende do número de vezes que determinado pixel foi computado como sendo extremo (BOARDMAN et al., 1995).

Nos modelos de mistura é possível gerar imagens-erro, as quais permitem avaliar os resultados. A proporção relativa de cada componente em um modelo de mistura varia de acordo com a área considerada. Normalmente, para aplicação em áreas urbanas, o erro gerado é grande, pois as componentes necessárias para descrever a composição de bairros residenciais são diferentes das necessárias para descrever as áreas centrais (FUCKNER, 2007).

Como na aplicação padrão dos MLMEs, um número fixo de componentes representativos de cada fração componente da cobertura do solo (geralmente entre 2 e 5) é selecionado e utilizado para modelar toda a imagem, é possível que se esteja subutilizando o potencial dos dados de sensoriamento remoto em discriminar materiais,

particularmente em ambientes urbanos, uma vez que estes possuem uma grande heterogeneidade espectral devido à variedade de materiais construtivos, a qual pode não ser bem representada por determinado conjunto fixo de componentes (POWELL et al., 2007).

A solução proposta por Roberts et al. (1998), denominada Modelo de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (do inglês *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* - *MESMA*), busca incorporar a diversidade espectral através da possibilidade de variação do número e tipo de componente para cada pixel da imagem.

O *MESMA* tem sido aplicado no mapeamento de áreas com cobertura de neve (PAINTER et al., 1998; 2003), no mapeamento de espécies vegetais (ROBERTS et al., 1998; DENNISON e ROBERTS, 2003a/2003b; ROBERTS et al., 2003), no mapeamento de solos em terras áridas (OKIN et al., 2001), na caracterização da temperatura do fogo (DENNISON e ROBERTS, 2006), no sensoriamento remoto de áreas urbanas (RASHED et al., 2003; POWELL et al., 2007) e até mesmo em várias aplicações planetárias (LI e MUSTARD, 2003; JOHNSON et al., 2006).

2.4. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (MESMA)

O modelo de mistura espectral com múltiplos componentes (*MESMA*) é uma adaptação do MLME que permite a variação do número e tipo de componente para cada pixel. No *MESMA*, uma série de MLMEs é aplicada na imagem e, para cada pixel, é escolhido o melhor modelo baseado em critérios como RMSE e valores de fração esperados (ROBERTS et al., 1998). Assim, o *MESMA* busca superar as limitações da aplicação dos MLMEs em ambientes urbanos, que exibem um alto grau de heterogeneidade espectral devido à sua composição.

Powell (2007) utilizou o *MESMA* para separar, na escala de sub-pixel, as frações de área impermeável, solo e vegetação da área urbana de Manaus, Amazonas, visando avaliar a aplicabilidade do mesmo para áreas urbanas. Os resultados da autora demonstram a necessidade de se gerar uma biblioteca espectral representativa de uma área de estudo

específica, buscando incorporar a variabilidade espectral desta área. Para a construção desta biblioteca, é necessário eliminar os espectros candidatos a componente que possuem uma alta probabilidade de causar confusão entre diferentes classes e identificar e selecionar os espectros mais representativos de cada classe. Algumas métricas auxiliam nesta seleção, e serão descritas a seguir.

2.5. O VIPER Tools para a Análise de Mistura Espectral

O aplicativo *Visualization and Image Processing for Environmental Research (VIPER) Tools*, desenvolvido por Roberts e Halligan (2007), foi desenvolvido em linguagem IDL (*Interactive Data Language*) com interface embutida no programa ENVI, e apesar de livre, não possui código fonte aberto. O VIPER Tools oferece um conjunto de ferramentas para a análise de mistura espectral, desde a criação e gerenciamento das bibliotecas espectrais até a aplicação de modelos de análise de mistura espectral simples ou modelos de mistura espectral com múltiplos componentes (*MESMA*).

Os dados de entrada podem estar em formato de número digital, radiância ou reflectância, e fatores de escala, tanto de entrada como de saída podem ser definidos. Os dados de saída possuem formato numérico de ponto flutuante. O programa encontra-se na versão 1.5, e é necessária a solicitação de uma licença para utilizá-lo.

O primeiro módulo do *VIPER Tools* consiste na construção de uma biblioteca espectral, a partir de ROIs (*Regions of Interest*) selecionados através da imagem que está sendo utilizada. Selecionados os espectros, procede-se com o cálculo de métricas de ajuste, através da criação do arquivo Matriz Quadrada, que auxiliarão na determinação dos espectros mais adequados para a aplicação do modelo.

A primeira métrica, denominada RMSE (eq.2), apresenta a raiz do erro médio quadrático de um espectro modelando o outro. A segunda, Ângulo Espectral (eq. 3), apresenta os valores de distância angular, em radianos, entre um espectro e outro. Esta métrica é a mesma utilizada pelo *Spectral Angle Mapper (SAM)*, implementada no ENVI.

$$\hat{\text{Ângulo Espectral}} = \text{acos}(\text{total}(A/\text{sqrt}(\text{total}(A^2))) * B/\text{sqrt}(\text{total}(B^2))) \quad (3)$$

em que A e B são vetores contendo os dados espectrais das componentes A e B. A terceira métrica, Fração de Componente, é a fração de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. A quarta métrica, Fração Sombra, corresponde à fração de sombra de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. É calculada através da subtração do valor da Fração de Componente do valor 1. Por fim, a quinta métrica, Código Restrito, contém valores 1 se o modelo foi parcialmente restrito (as frações modeladas excederam o limite, mas não excederam o limiar de aceitação do erro), valores 2 se o modelo foi completamente restrito (o limiar de aceitação do erro foi excedido) e 0 (zero) para modelos sem qualquer restrição (Roberts e Halligan, 2007).

A partir dessas métricas é possível selecionar os espectros mais representativos da classe a qual pertencem para comporem a biblioteca espectral final. Para tal, são utilizadas as técnicas de Erro Médio do Componente (EAR – *Endmember Average RMSE*), de Mínimo Ângulo Espectral Médio (MASA – *Minimum Average Spectral Angle*) e de Seleção de Componentes Baseada em Contagem (COB – *Count-based Endmember Selection*).

O EAR foi primeiramente proposto por Dennison e Roberts (2003) e consiste na média do RMSE produzido por um espectro de um componente quando utilizado para modelar todos os outros espectros dos demais componentes de sua classe.

O MASA (Dennison et al., 2004) é similar ao EAR, com a diferença de utilizar como medida de erro, ao invés de RMSE, o ângulo espectral. Segundo Roberts e Halligan (2007), o MASA é mais seletivo para objetos escuros, enquanto o EAR, para objetos claros. De acordo com os autores, diferenças sutis entre espectros de objetos escuros causam um aumento do ângulo espectral enquanto uma pequena diferença no RMSE. Para objetos claros ocorre o inverso.

A técnica COB foi proposta por Roberts et al. (2003), e baseia-se na seleção de um único componente para modelar tanto os demais componentes de sua classe como pra

modelar os componentes das classes diversas da sua. Esse procedimento é repetido utilizando-se todos os componentes da biblioteca. Como resultado, é apresentado o número total de espectros dentro de uma classe modelados por um espectro desta mesma classe (in_COB), e ainda uma medida de confusão entre as classes, out_COB, que apresenta o número total de espectros de uma determinada classe modelados por um espectro de outra classe. Idealmente, procura-se um alto valor de in_COB e um baixo valor de out_COB. A seleção desses valores é auxiliada por um terceiro índice, o COBI (*Count Based Index*), definido pela razão de in_COB por out_COB, este último multiplicado pelo número de espectros da classe. Altos valores de in_COB e COBI representam um componente a ser selecionado para o modelo de mistura. Espectros com valores baixos de COBI só devem ser aceitos caso possuam um alto valor de in_COB (ROBERTS et al., 2007).

O aplicativo *VIPER Tools* permite a aplicação tanto de modelos de mistura simples como com múltiplos componentes. É possível definir valores restritivos às frações mínimas e máximas, limiar de aceitação do erro e fração máxima de sombra permitida.

O arquivo resultante consiste em tantas imagens-fração quantas forem as bibliotecas de entrada (uma a três), uma imagem com a fração sombra, uma imagem com os resíduos para cada banda, uma imagem classificada, onde cada classe corresponde ao modelo utilizado para modelar o pixel pertencente a esta classe e, por fim, uma imagem erro (RMSE). É gerado também um arquivo de metadados, onde pode ser verificado qual componente foi utilizada e quantos pixels foram modelados por cada modelo.

As últimas etapas do aplicativo visam à Normalização de Sombra (*Shade Normalize Spectral Mixture Analysis Results*) e Correção do Terreno (*Terrain Correct Spectral Mixture Analysis Results*). Como a sombra não é considerada uma componente da cobertura do solo, mas sim a variação de brilho das componentes, esta é convertida em frações de componentes através do procedimento de Normalização de Sombra (ADAMS et al., 1993), a partir do qual a soma das componentes para cada pixel passa a corresponder ao valor 1. O módulo de Correção do Terreno permite minimizar os efeitos de sombreamento causados pela topografia acidentada, utilizando para isso as

imagens fração e um MDE (Modelo Digital de Elevação) para desenvolver uma relação empírica entre a fração de sombra e o ângulo de incidência local. Estudos ainda estão sendo conduzidos para avaliar os benefícios da minimização dos efeitos de sombreamento topográfico antes ou depois da aplicação dos modelos de mistura espectral (ROBERTS et al., 2007).

Conforme implementado no *VIPER Tools*, o *MESMA* permite modelar cada pixel da imagem através de um modelo de até 4 componentes, sendo as combinações efetuadas automaticamente. Caso um pixel seja modelado por um número de componentes inferior ao necessário, a porção não modelada do pixel será grande, e conseqüentemente o erro será alto. Porém, a utilização de um número de componentes maior do que o necessário resultará em erros de fração, causados pela confusão entre espectros de componentes (RASHED, 2004). Além disso, estudos prévios relatam correlação positiva entre a complexidade do modelo e o gasto com processamento computacional (HALLIGAN, 2002; ROBERTS et al., 1998a). Sendo assim, o critério da mínima complexidade deve ser considerado no momento da seleção do melhor modelo para cada pixel (POWELL, 2007).

Segundo Fuckner (2007), o fato de não apresentar uma rotina de seleção do melhor modelo para cada pixel ainda é uma das limitações do *VIPER Tools*. Tal procedimento deve ser realizado pelo usuário em cada uma das imagens-fração de dois, três ou quatro componentes, conforme o número de bibliotecas espectrais selecionadas.

2.6. Estudos Multitemporais de áreas urbanas

As mudanças de cobertura do solo em áreas que vêm sofrendo rápido processo de urbanização provocam significativa preocupação (POWELL et al., 2008). Quando a cobertura vegetal dá lugar à ocupação urbana, alterações fundamentais ocorrem nas propriedades dos ecossistemas (MCKINNEY, 2002), incluindo o ciclo das águas e nutrientes e o realocamento da fauna e flora local (RADELOFF et al., 2005). Para se entender a dinâmica física do ambiente urbano, faz-se necessário quantificar as mudanças de diversos parâmetros ambientais, alguns dos quais podem ser medidos in

loco, enquanto outros, devido às dificuldades operacionais, são mais facilmente mensurados através do sensoriamento remoto (SMALL, 2002).

Os estudos multitemporais de imagens orbitais, que permitem tais mensurações, baseiam-se na resposta espectro-temporal dos alvos presentes na superfície terrestre. Análises quantitativas em áreas urbanas são dificultadas devido tanto à heterogeneidade espectral dos alvos contidos no IFOV do sensor como às alterações temporais na iluminação e condições atmosféricas (SMALL, 2002). Buscando contornar tais problemas, alguns estudos propõem a combinação de análise de mistura espectral com retificação radiométrica multitemporal.

Small (2002) avaliou a aplicação da normalização radiométrica baseada na seleção de pixels pseudo-invariantes para posterior aplicação dos modelos de mistura, tendo concluído que, a partir da utilização desta técnica em imagens Landsat TM, é possível monitorar variações sazonais e interanuais na reflectância de áreas urbanas e abundância de vegetação.

Powell et al. (2008) utilizaram tal abordagem em uma série de 34 anos de imagens Landsat (1972-2006) para estimar a quantidade de solo convertida em superfície impermeável em função da urbanização em dois municípios do estado de Washington. Concluíram que tal metodologia representa uma forma efetiva e acurada de quantificar a impermeabilização do solo ao longo do tempo para grandes áreas. Segundo os autores, a normalização radiométrica entre as datas permite que uma única biblioteca espectral, contendo os espectros de uma imagem referência, seja necessária para modelar todas as demais datas.

Como estudos multitemporais consideram essencialmente o comportamento espectral dos alvos ao longo do tempo, é de extrema importância que sejam aplicadas correções radiométricas adequadas nas imagens (SONG et al., 2001). Schroeder et al. (2006) sugeriu um procedimento de normalização que considera os pixels pseudo-invariantes das imagens (SCHOTT et al., 1988). Nielsen et al. (1998) e posteriormente Nielsen (2007) propuseram uma técnica baseada em análise de correlação canônica para encontrar os pixels pseudo-invariantes de forma automática. Esta técnica está

implementada em linguagem IDL, e é conhecida como *Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection* (IR-MAD) (CANTY e NIELSEN, 2008). Como dado de saída, o aplicativo gera imagens calibradas radiometricamente através dos pixels definidos automaticamente como pseudo-invariantes. Uma adaptação no algoritmo original referente ao formato do dado de saída pode ser conferida em Mello (2009).

2.7. Imagens Landsat-5/TM

O satélite de sensoriamento remoto Landsat-5 é hoje o mais antigo em operação. Lançado em 1º de março de 1984 e tendo sido projetado para uma vida útil de três anos, completou 25 anos de operação em 2009.

O sensor TM, a bordo do satélite Landsat-5, é um instrumento imageador óptico multiespectral. Esse instrumento opera em sete bandas espectrais, gerando imagens na região do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal (JENSEN, 2007). Os respectivos intervalos espectrais são descritos na tabela 1.

Tabela 2.1 – Características do sensor Landsat/TM.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Faixa Imageada (km)
TM	1	0,45 - 0,52			
	2	0,50 - 0,60			
	3	0,63 - 0,69	30		
	4	0,76 - 0,90		16	185
	5	1,55 - 1,75			
	6	10,4 - 12,5	120		
	7	2,08 - 2,35	30		

O IFOV (Instantaneous Field Of View) do sensor TM proporciona imagens com uma resolução espacial com cerca de 30 metros (visível, IVP e IVM) e 120 metros (IVT). A resolução radiométrica é definida em 8 bits (intervalo que varia de 0 a 255 níveis de cinza), dispondo de uma faixa imageada de 185 km. A órbita do satélite Landsat é repetitiva, circular e heliosíncrona (sincronizada com o Sol), permitindo a passagem da plataforma na mesma hora solar em qualquer ponto observado. Além disso, a órbita quase

polar (98,20° de inclinação) permite a cobertura de praticamente todo o planeta (JENSEN, 2007).

2.8. Imagens QuickBird e IKONOS

As imagens do sensor QuickBird (Digital Globe Inc.) possuem resolução espacial de 2,44 metros nas bandas multiespectrais e 0,61 metros (no nadir) na pancromática (banda PAN). As bandas multiespectrais compreendem as seguintes faixas do espectro: 0,45 a 0,52 μm ; 0,52 a 0,60 μm ; 0,63 a 0,69 μm ; 0,76 a 0,90 μm . A pancromática compreende a faixa de 0,45 a 0,90 μm .

Já as imagens do IKONOS II, lançado em 24 de setembro de 1999, são disponibilizadas em 4 bandas multiespectrais, as quais possuem resolução espacial de 4 metros, e 1 banda pancromática, de 1 metro de resolução. As bandas multiespectrais compreendem as seguintes faixas do espectro: 0,45 a 0,53 μm ; 0,52 a 0,61 μm ; 0,64 a 0,72 μm ; 0,77 a 0,88 μm . A pancromática compreende a faixa de 0,45 a 0,90 μm .

Em função de sua alta resolução espacial, tais imagens vêm sendo bastante aplicadas em estudos urbanos (BLASCHKE e KUX, 2005; MELO, 2002), inclusive em análises multitemporais (ARAÚJO, 2006). Porém, para estudos urbanos que remetem a datas anteriores a 2000, não é possível sua utilização, devido à data de lançamento dos satélites. Outra limitação da utilização destes produtos é o alto custo de aquisição das imagens, inviabilizando assim a coletânea multitemporal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma demonstrado através da figura 3.1 apresenta os principais procedimentos metodológicos abordados neste trabalho, que serão detalhados nas seções seguintes.

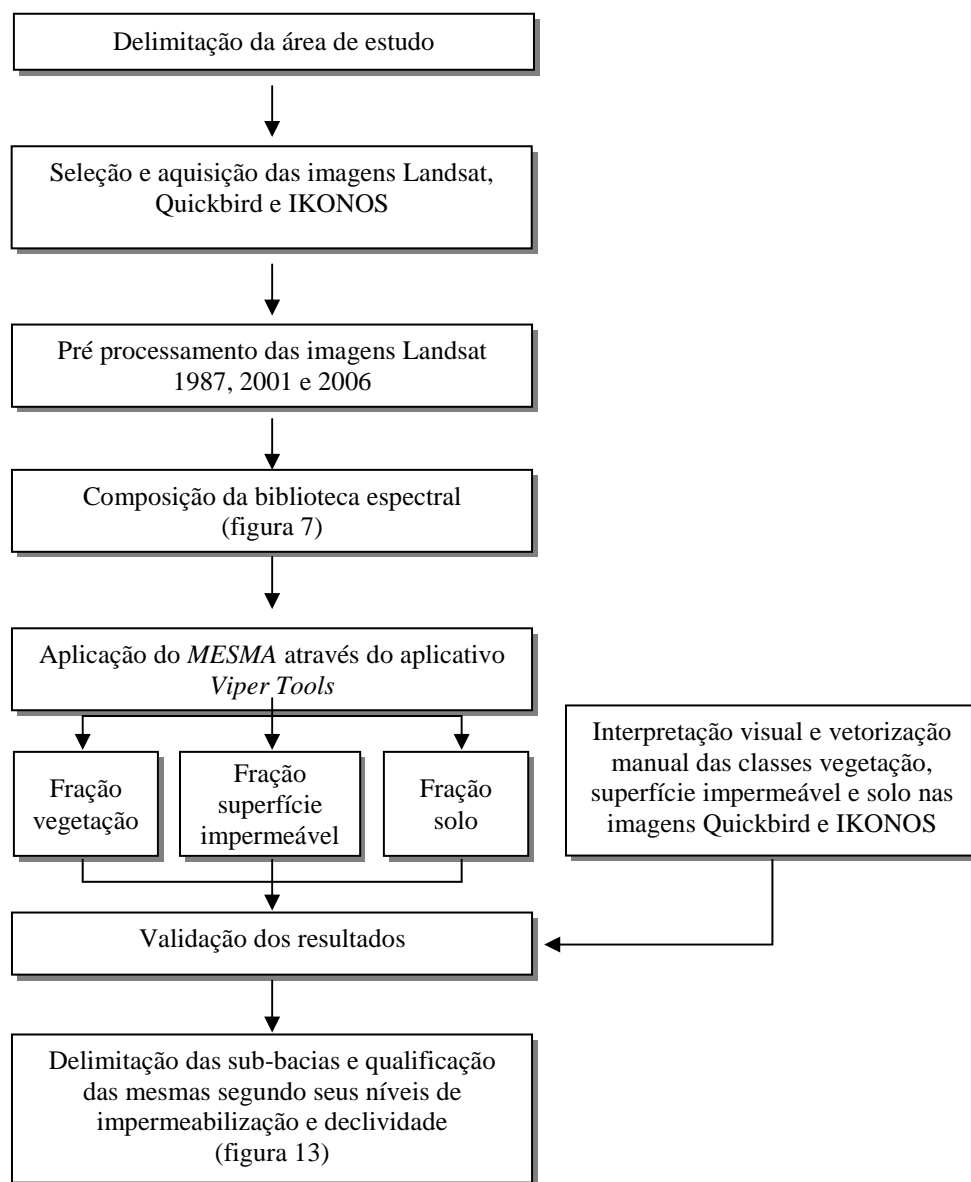


Figura 3.1 – Fluxograma compreendendo as principais etapas metodológicas.

3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a porção urbana do município de Manaus, estado do Amazonas (Figura 3.2), situada à margem esquerda da confluência entre os rios Negro e Solimões (coordenadas X 60° 1' 12" O e Y 3° 6' 8" S). Manaus é a capital do estado do Amazonas, sendo sua cidade mais populosa – aproximadamente 1,6 milhões de habitantes, segundo estimativas do IBGE (2007).

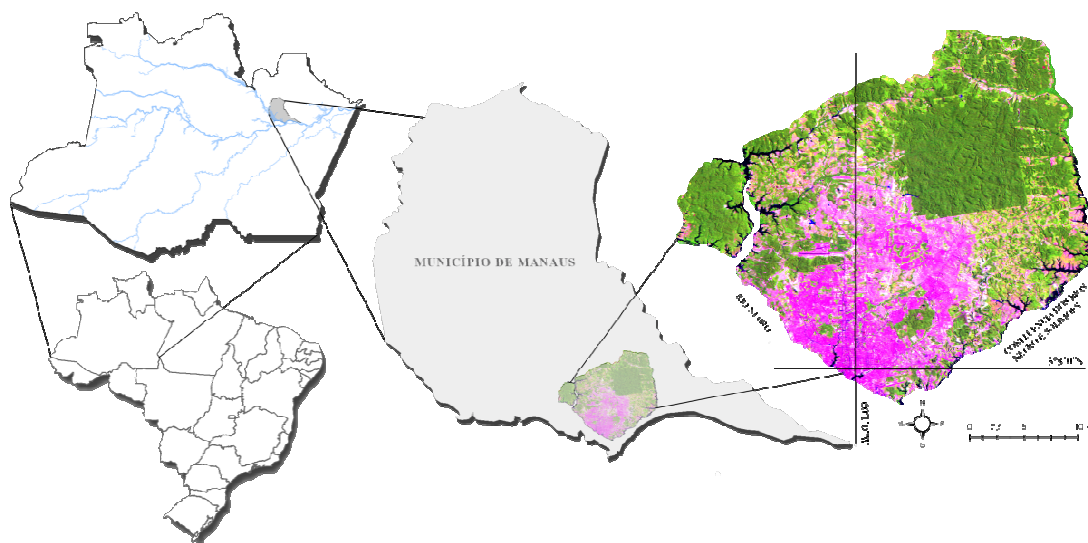


Figura 3.2 – Área de estudo – área urbana de Manaus (projeção UTM, zona 20 S)

Por se localizar na região equatorial, o clima de Manaus é quente e úmido, com temperatura média anual de 28°C e umidade relativa do ar média de 90%. As precipitações anuais variam em frequência e intensidade ao longo do ano: no período compreendido entre os meses de novembro e maio são mais abundantes, sendo o período de junho a outubro de estiagem (INMET, 2008).

O processo de ocupação da cidade de Manaus foi impulsionado pelo período áureo da borracha, nas últimas décadas do século XIX, momento em que o Amazonas recebeu imigrantes de várias localidades do Brasil e do mundo em busca do produto que vinha sendo extraído em grande escala e era rentável – o látex da seringueira.

Esse período pode ser caracterizado, do ponto de vista da morfologia da cidade, como o de expansão e criação de infra-estrutura e serviços urbanos, que se desenvolvem menos pelas condições geográficas e mais pelo impulso que adquiriram com o crescimento econômico determinado pela produção e pela exportação da borracha. Manaus se encontrava, no período áureo da borracha, mais ligada ao mercado externo do que ao mercado nacional. Portanto, a espacialidade produzida em Manaus no período da borracha, mais do que uma determinação nacional e local, é uma determinação do exterior. É importante considerar o fato de que há uma minoria interna que se beneficiou com o processo de exploração do látex e com a expansão dos serviços urbanos (MESQUITA, 1997; DIAS, 1999; OLIVEIRA, 2003).

O *boom* da borracha, que perdura até 1912 possibilitou, mesmo com as contradições apontadas, que a cidade passasse por um significativo processo de modernização, resultado dos efeitos imediatos da exploração e da exportação do látex como principal produto, e que se completara em uma economia voltada para a exportação de matérias-primas e de gêneros tropicais (LOUREIRO, 1986).

A partir de 1911, ocorreu o declínio da produção e dos preços, e tal atividade econômica começou a decair. Como consequência, os trabalhadores dos seringais começaram a migrar para a cidade, em busca de outros meios de subsistência, melhores condições de vida e infra-estrutura adequada – sistema de saúde, moradias decentes, entre outros benefícios que somente o meio urbano poderia oferecer. Desde então, a cidade sofreu imensa expansão de forma desordenada, que acarretou em uma série de problemas na organização do território e na própria infra-estrutura.

Mas o que de fato ocasionou impacto na paisagem urbana de Manaus foi a criação da Zona Franca de Manaus e implantação do Distrito Industrial, em 1967, baseadas no projeto geopolítico e de desenvolvimento – destinado a refazer e reforçar os laços da região com o conjunto do país e a abrir a Amazônia ao desenvolvimento extensivo do capital.

A Superintendência da Zona Franca de Manaus (Suframa), órgão do governo federal responsável pela administração e pelo planejamento da Zona Franca, implantou incentivos fiscais para que indústrias estrangeiras se instalassem em Manaus. A necessidade de vasta mão de obra atraiu trabalhadores de várias cidades do Brasil.

Incentivos fiscais restritos a Manaus, a conseqüente falta de investimentos privados no interior e a ausência do Estado (que investe mais de 90% dos recursos apenas em Manaus) foram fatores contribuintes para que mais da metade da população do estado se concentrasse na capital (OLIVEIRA, 2006).

A partir desse processo de ocupação, a frágil paisagem ambiental desta cidade foi modificada pela falta de planejamento e monitoramento, o que produziu uma ocupação desordenada do território, gerando à cidade altos índices de informalidade ou ilegalidade e desigualdade social (SEPLAN, 2006), resultando em trágicos resultados ambientais e sociais. Hoje, por exemplo, em maior ou menor grau, todos os igarapés urbanos estão poluídos, e pelo menos 10 bairros encontram-se em áreas sujeitas a alagamento em função das chuvas intensas (CPRM, 2008).

A expansão ao sul está limitada pela presença dos rios Negro e Solimões, e o adensamento das áreas já dotadas de infra-estrutura é dificultado devido aos valores elevados dessas áreas no mercado. Porém, novas ocupações ocorrem a cada dia, expandindo os limites horizontais sobre áreas florestadas e nascentes nas zonas leste e norte do município, sem nenhuma restrição ambiental e sem considerar as características biofísicas da paisagem.

A área urbana de Manaus abrange 4 bacias, sendo estas: Educandos, Puraquequara, Tarumã e São Raimundo. Dentre estas, as bacias do São Raimundo e Educandos (figura 3.3) são as que sofreram maior ocupação nos últimos anos e hoje comportam mais da metade da população urbana, como é possível estimar através da espacialização dos dados do IBGE (2007).

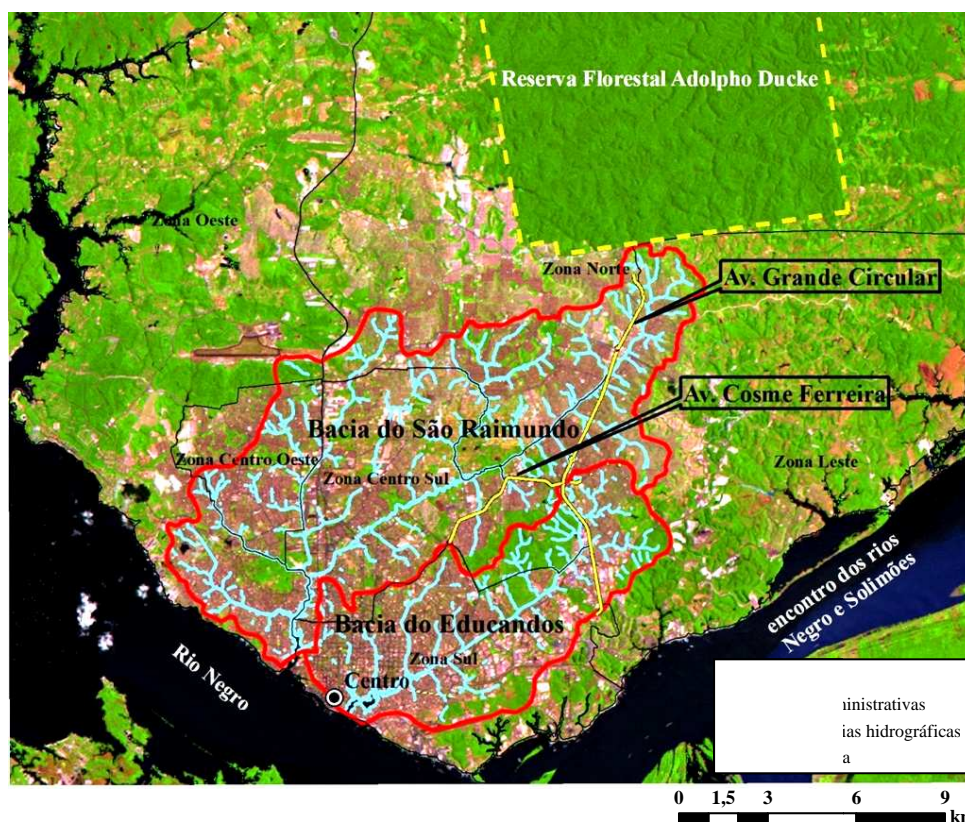


Figura 3.3 – Imagens Landsat TM (composição R5 G4 B3) da área de estudo, ano 2006, contendo a delimitação das duas bacias urbanas de maior densidade ocupacional e os igarapés contribuintes destas.

Como consequência da alta taxa de ocupação nesta bacia, devido à inexistência de um plano Diretor que considere a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, nos últimos anos foi possível presenciar diversos eventos de enchente, os quais causaram prejuízos tanto à população quanto ao município (Figura 3.4). Ainda assim, a ocupação continua crescendo, e muitas áreas já estão sendo verticalizadas em função da falta de espaço. Os igarapés estão sendo canalizados e os fundos de vale, que antes eram ocupados pelo leito secundário da água, estão dando lugar a novas vias e empreendimentos imobiliários.

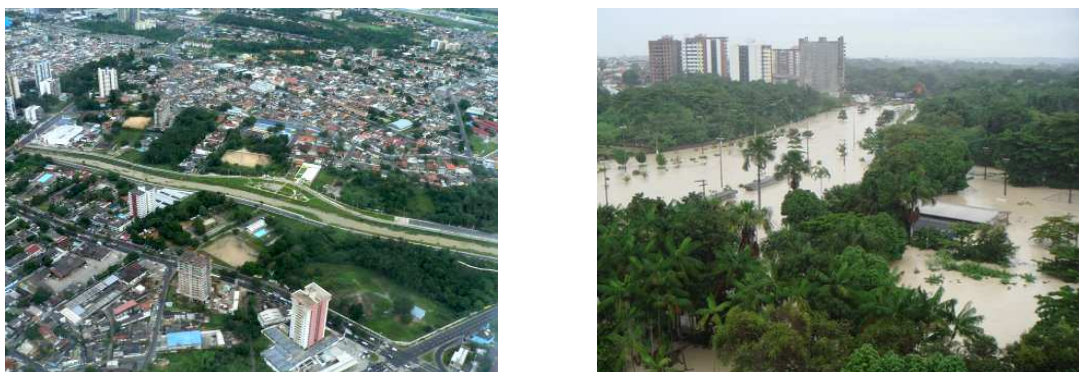


Figura 3.4 – Igarapé do Mindu, o principal igarapé da bacia do São Raimundo, em dois momentos: (a) dia seco, em seu curso normal; (b) após um evento de chuva intensa (ano 2007), transbordado.

Fonte: (a) arquivo pessoal (2006); (b) [http://www.panoramio.com/photo/1747421\(2007\)](http://www.panoramio.com/photo/1747421(2007)) (acesso em 10 ago. 2010)

3.2. Imagens utilizadas

As imagens do sensor TM/Landsat foram escolhidas em função qualidade dos dados gerados, pela facilidade e gratuidade no acesso dos dados e pelo longo período de vida proporcionado pelo programa Landsat, que permitiu obter imagens para todo o período de estudo. As cenas da área de interesse foram adquiridas, sem custo, através do catálogo de imagens do INPE hospedado na web, através do sítio <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>, e correspondem, no sistema WRS (*Worldwide Reference System*) do Landsat, à órbita/ponto 231/062. Foram utilizadas as bandas 1 a 5 e 7.

Como este trabalho objetiva a análise do processo de impermeabilização ao longo do tempo, foram utilizadas três datas distintas para tal, sendo a mais recente de 02 de setembro de 2006, uma de 02 de julho de 2001, e a última e mais antiga de 12 de julho de 1987, todas com boas condições de visibilidade e livres de nuvens. A imagem mais recente foi selecionada como imagem referência, ou seja, a partir dela as demais datas serão normalizadas radiometricamente e dela serão selecionados os componentes para integrar a biblioteca espectral.

A data de referência foi selecionada em função da disponibilidade de uma imagem de alta resolução espacial com data de imageamento aproximada à da referência

(Quickbird²), que permitirá a realização da validação dos resultados da aplicação do modelo de mistura. A imagem de 2001 foi selecionada para calibração da biblioteca espectral também em função da disponibilidade de uma imagem de alta resolução espacial adquirida no mesmo ano (IKONOS³). Através da aplicação da biblioteca espectral, composta por espectros extraídos da imagem de 2006, sobre a imagem de 2001, será possível avaliar a acurácia dos resultados, comparando-se as frações de componentes obtidas à imagem de alta resolução espacial IKONOS. A cena Landsat de 1987 foi selecionada por representar a data mais antiga disponível, adquirida pelo sensor TM, sem cobertura de nuvens sobre a área de estudo.

3.3. Pré processamento das imagens

Correção Geométrica

Uma das abordagens para a correção geométrica de imagens de sensoriamento remoto estabelece uma transformação polinomial do sistema de referência da imagem. Os parâmetros do polinômio são definidos por um ajuste por mínimos quadrados entre a posição dos pixels da imagem e as coordenadas geográficas correspondentes no campo, utilizando informações de cartas, pontos coletados “in situ” ou outra imagem georreferenciada. Esta transformação pode ser utilizada para corrigir a geometria da imagem, independente do conhecimento das fontes de distorções, tipos de distorções e da plataforma usada para aquisição de dados (RICHARDS e JIA, 2006)

Pelo fato de as imagens TM multitemporais e a imagem Quickbird terem sido obtidas em datas diferentes e segundo diferentes parâmetros geométricos de aquisição, foi realizado o co-registro antes das demais fases de processamento. A imagem Quickbird foi adquirida pela Prefeitura Municipal de Manaus já com as devidas correções geométricas, e foi utilizada como base.

² Mosaico Quickbird de diferentes datas, compreendendo o ano de 2006, cedido pela Prefeitura Municipal de Manaus.

³ Mosaico IKONOS II de diferentes datas, compreendendo o ano de 2001, cedido pela Prefeitura Municipal de Manaus.

O registro utilizou a metodologia de pontos homólogos nas duas imagens: imagem base e imagem a ser registrada. Polinômios de segundo grau foram utilizados na modelagem das equações de correspondência. Os valores de *RMS* obtidos foram inferiores a 0,5 pixel, tanto para as imagens TM como para a IKONOS, conforme recomendado por Dai e Khorram (1998).

Correção Radiométrica

A conversão de Números Digitais em valores físicos é um procedimento comum entre os usuários de imagens de sensoriamento remoto, pois permite minimizar as variações decorrentes do processo de aquisição das imagens (BENTZ, 1990).

A transformação dos números digitais para valores de radiância compensa as diferenças entre ganhos e “off-set” de cada banda espectral. Já a conversão desses valores de radiância em valores de reflectância compensa as diferenças quanto à irradiância solar no topo da atmosfera e o ângulo de incidência da radiação sobre o alvo, no momento da aquisição da imagem. Desta forma, a transformação para dados de reflectância aparente é mais eficiente para reduzir a variabilidade da resposta espectral (NELSON, 1985).

Para recuperar os valores de radiância e reflectância aparente é necessário utilizar os parâmetros de calibração radiométrica. Esses parâmetros são definidos na fase de calibração, que antecede o lançamento do sensor, e são atualizados periodicamente enquanto o sistema está em órbita (CHANDER e MARKHAM, 2003).

As transformações radiométricas nas imagens foram realizadas segundo o proposto por Schroeder et al. (2006). Inicialmente, procedeu-se com a conversão da imagem selecionada como referência (Landsat TM de 2006) para valores de reflectância de superfície através do método físico de correção atmosférica para a geração de imagens de reflectância de superfície implementado no aplicativo *FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes - Research Systems, 2004)*, que utiliza o código *MODTRAN (Moderate Resolution Transmission Model)*. Este método pode ser usado para correção de imagens de qualquer sensor, desde que sejam fornecidas as características espectrais e os dados de calibração radiométrica do sensor.

Para a correção atmosférica e obtenção da imagem de reflectância de superfície, foram inseridos no aplicativo *FLAASH* os seguintes parâmetros de aquisição de imageamento: coordenada geográfica central da cena, elevação do terreno, altitude de vôo e horário de aquisição. A elevação do terreno adotada foi a média da cena, de 90 metros. Foi adotado o modelo Tropical de atmosfera e o modelo Urbano de aerossóis, sem a utilização da opção de processamento com a estimativa K-T (Kauffman-Tanré) de aerossóis ou da estimativa *WR* (*Water Retrieval*) de vapor d'água. Para a correção do vapor d'água foi utilizada a opção de multiplicador *WCM* (*Water Column Multiplier*) de valor fixo de 0.35 (MOREIRA, 2008). A concentração de CO₂ utilizada foi a sugerida no guia do usuário do *FLAASH*, em 390 ppm. O valor de visibilidade adotado foi de 50 Km, o qual foi estipulado empiricamente com base no valor de profundidade óptica de aerossol à 550nm obtida através do produto MOD04⁴, uma vez que a visibilidade e a profundidade óptica de aerossol estão diretamente relacionadas (PINTO, 2001).

Com a imagem referência em valores de reflectância de superfície, procedeu-se à normalização radiométrica das demais datas, através do método proposto por Canty e Nielsen (2008), denominado *Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection* (*IR-MAD*). O parâmetro de entrada chamado de “penalization” foi definido como nulo, conforme sugerido por Nielsen e Canty (2005).

3.4. Modelo de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes

Devido à grande heterogeneidade espectral encontrada em ambientes urbanos, a aplicação de um modelo linear de mistura espectral padrão, ou seja, baseado na aplicação de um conjunto fixo de componentes para todos os pixels da imagem, pode representar uma abordagem falha por ocasionar alto índice de resíduos ou de pixels não modelados (POWELL, 2007). Em função disto, a metodologia definida para este trabalho baseia-se na possibilidade de variação do número e tipo de componente pixel a pixel, através da aplicação do Modelo de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (*MESMA*).

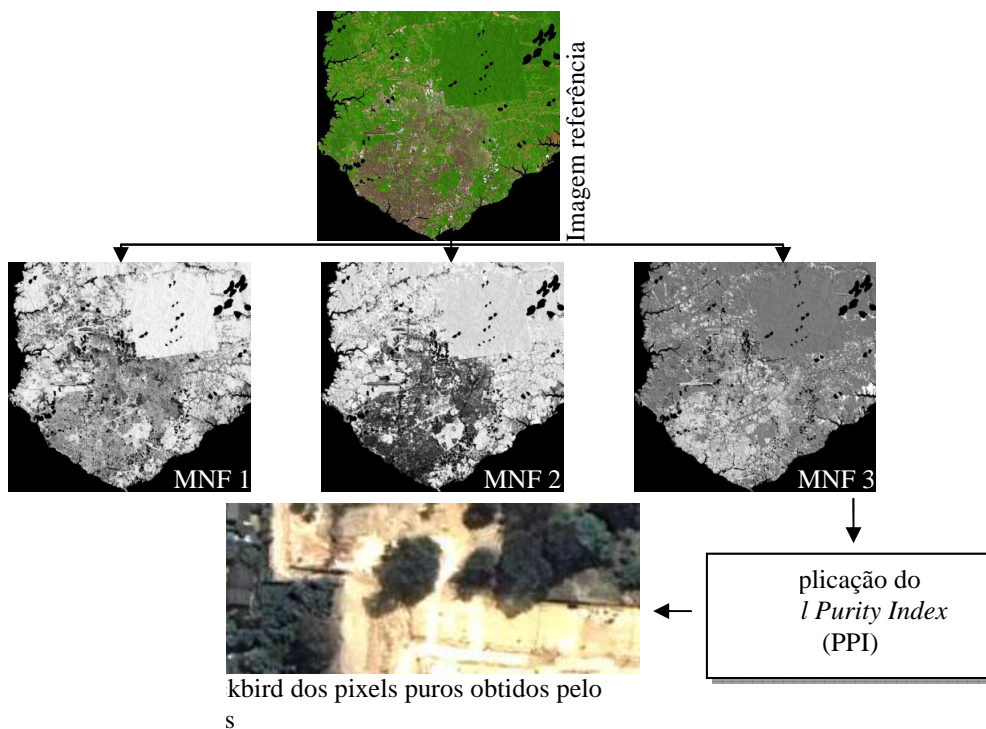
⁴ As especificações dos produtos MODIS podem ser acessadas em <<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>>. Acesso em 08 maio 2009.

A fase mais importante para a aplicação de qualquer modelo de análise de mistura espectral consiste na seleção dos espectros que comporão a biblioteca espectral, pois estes devem ser representativos da complexidade espectral dos alvos da área em estudo. As bibliotecas espectrais dos MLMEs padrões geralmente são compostas por espectros extremos, conhecidos como puros, para representar cada alvo de interesse (ADAMS et al., 1995; BOARDMAN et al., 1995; SMITH et al., 1985). Já para compor a biblioteca do *MESMA*, é considerado idealmente o conjunto de espectros que representam a variação espectral de cada material na cena em estudo (POWELL et al., 2007; OKIN et al., 2001; PAINTER et al., 1998; ROBERTS et al., 1998).

A metodologia de seleção das componentes para este estudo está demonstrada na figura 3.5. Todos os componentes foram derivados da imagem, conforme proposto por SMITH et al., 1990 e ADAMS et al., 1995. Como se trata de um estudo em área urbana, os componentes selecionados podem ser agrupados em Vegetação, Superfícies Impermeáveis, Solo e Sombra (RIDD, 1995). A componente vegetação foi dividida em vegetação verde e vegetação seca.

Inicialmente, uma máscara de água foi gerada através do fatiamento da banda 7 da imagem de 02 de julho de 2001 e posterior análise e correção manual. Também foi gerada uma máscara de nuvens e sombras de nuvens através de vetorização manual sobre as imagens das três datas. Tanto os corpos d'água quanto as nuvens e suas sombras foram eliminados das análises por não representarem objetivo deste estudo.

A primeira seleção de componentes foi realizada através da aplicação do Pixel Purity Index sobre as três primeiras bandas resultantes da transformação *Minimum Noise Fraction* sobre a imagem referência, e posterior inspeção visual dos pixels e de seus espectros. Os pixels que representavam as componentes alvo deste estudo e que foram identificados como puros através do *PPI* foram transformados em Regiões de Interesse (*ROI – Regions of Interest*), formato necessário para a entrada de dados no aplicativo *VIPER Tools*.



2ª seleção de componentes

3ª seleção de componentes

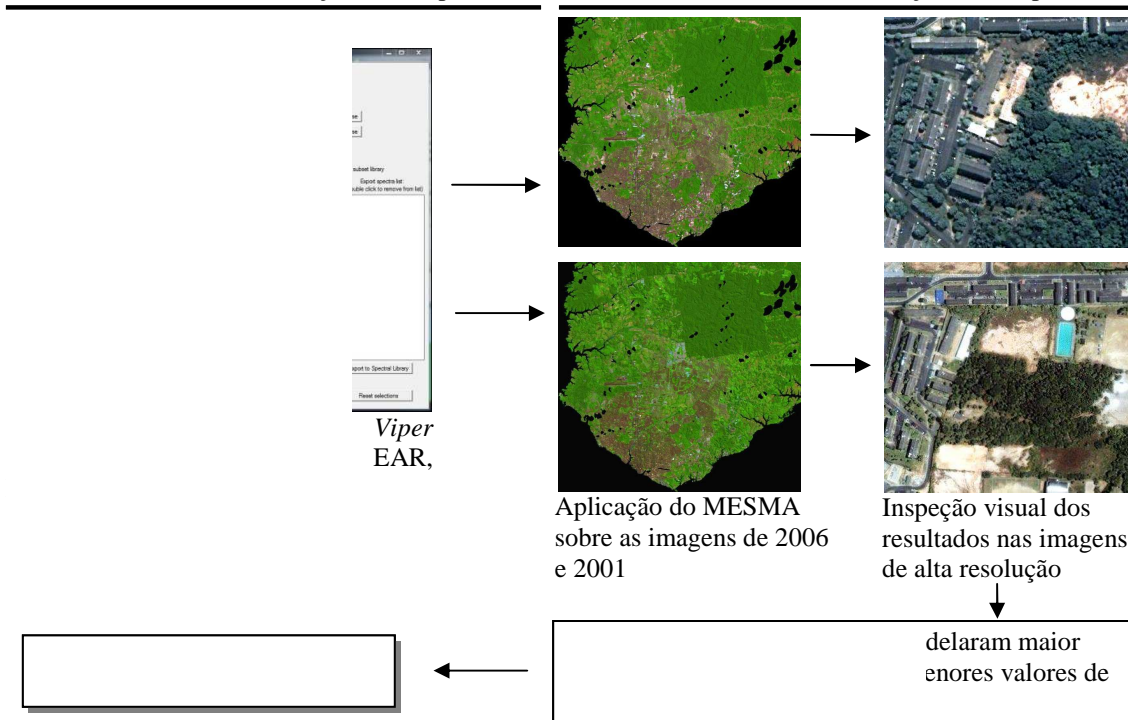


Figura 3.5 – Fluxograma metodológico de seleção das componentes para compor a biblioteca espectral final do MESMA. MNF 1, MNF 2 e MNF 3: primeira, segunda e terceira componentes resultantes da aplicação da transformação Minimum Noise Fraction, respectivamente.

O primeiro módulo do *VIPER Tools* executa a função de importação das *ROIs* e criação de uma biblioteca espectral com extensão “.sli”. Logo em seguida, gera-se um arquivo de metadados, contendo os identificadores de cada pixel e sua localização na imagem (x,y), que pode ser incrementado em qualquer editor de tabela, tendo-se o cuidado de manter a formatação original dos dados gerados na etapa anterior (colunas 1 e 2 da tabela). Este arquivo foi editado através do Microsoft Excel, e nele foi inserida uma coluna com a informação de qual classe o pixel pertence (solo, vegetação, vegetação seca ou superfície impermeável).

Nos dois módulos seguintes, é possível visualizar os espectros de cada pixel e gerenciar as bibliotecas espectrais, realizando fusões entre duas ou mais bibliotecas e alterando-se o fator de escala da reflectância. Como apenas uma biblioteca foi gerada a partir dos *ROIs*, nenhuma fusão fez-se necessária. O fator de escala selecionado foi de 1000, uma vez que as imagens de reflectância de superfície geradas a partir do aplicativo *FLAASH* encontram-se nessa escala.

Posteriormente, foi gerado o arquivo de matriz quadrada a partir do módulo “*Create Square Array*”. Este arquivo contém as métricas de ajuste, base para o cálculo das técnicas de seleção de componentes do *VIPER Tools*. Os valores para essas métricas foram definidos conforme sugere a literatura (ROBERTS et al., 1998), sendo estes -0,05 para fração mínima, 1,05 para fração máxima, 0,025 para o limiar de aceitação de erro, e o método adotado foi o parcialmente restrito.

As métricas de ajuste calculadas através da matriz quadrada são utilizadas, no módulo seguinte – “*Calculate EAR/MASA/CoB*”, para a determinação dos espectros mais representativos de sua classe. Nesta etapa, foram selecionados para compor a biblioteca espectral os espectros que apresentaram os menores valores de *EAR*, *MASA* e *out_COB* e maiores valores de *in_COB*.

Como os pixels mais representativos da biblioteca espectral não necessariamente correspondem aos mais representativos dos alvos em estudo (SONG, 2005), a biblioteca espectral gerada a partir do *VIPER Tools* não foi considerada como sendo a biblioteca

espectral final⁵, uma vez que todos os parâmetros de seleção utilizados até então se basearam na relação entre os espectros integrantes da biblioteca. Para a seleção final de espectros, o *MESMA* foi aplicado sobre a imagem referência, inicialmente utilizando-se apenas 2 componentes, sendo o primeiro proveniente da biblioteca espectral e o segundo, sombra fotométrica⁶. Optou-se pela utilização da sombra fotométrica em função de estudos anteriores terem concluído que a inclusão de um pixel como referência para modelar a fração sombra conduz ao aumento da fração de erro (FUCKNER, 2007; NUNES e SOUZA Jr., 2007). Os parâmetros definidos nessa etapa foram: -0.05 e 1.05 para fração mínima e máxima permitida de componente, respectivamente, 0.80 para fração máxima de sombra permitida e 0.025 para *RMSE*. A mesma biblioteca espectral foi também aplicada sobre a imagem de 2001, utilizando-se os mesmos parâmetros.

A partir dos resultados gerados, foram selecionados para compor uma nova biblioteca espectral aqueles espectros que modelaram maior quantidade de pixels nas duas imagens e ao mesmo tempo geraram menores valores de *RMSE*. Tais pixels foram inspecionados visualmente na imagem Quickbird (para os resultados obtidos sobre a imagem de 2006) e na imagem IKONOS (para os resultados obtidos sobre a imagem de 2001) a fim de confirmar sua adequação às componentes que os modelaram.

Procedeu-se então com a criação de uma máscara sobre os pixels das imagens das duas datas (uma máscara para cada imagem) não modelados segundo os critérios adotados, e sobre estes foi aplicado o modelo *MESMA* com 3 componentes, sendo os dois primeiros compostos pelos espectros selecionados segundo a metodologia descrita anteriormente, e o terceiro, sombra fotométrica. Uma nova máscara foi criada para os pixels não modelados através de 2 ou 3 componentes, e sobre estes aplicou-se o modelo *MESMA* com 4 componentes, sendo os três primeiros compostos por espectros da biblioteca e o quarto, sombra fotométrica. Estudos anteriores demonstraram que a utilização de mais

⁵ Entende-se por “biblioteca espectral final” aquela que será efetivamente utilizada para gerar as frações de componentes finais.

⁶ O *VIPER Tools* possibilita a utilização de um dos dois tipos de sombra: fotométrica, para a qual assume-se valor de reflectância igual a zero, e não-fotométrica, para a qual é necessário a coleta de pixels que representem os valores de reflectância respectivos à sombra (ROBERTS et al., 2007).

componentes não resulta em melhores resultados (POWELL et al., 2007). Portanto, os pixels não modelados através de 2, 3 ou 4 componentes foram incluídos na classe “não modelados”. Todas as frações resultantes foram normalizadas segundo à fração de sombra.

Com a adoção da metodologia descrita, pode-se considerar os pixels selecionados como sendo os mais representativos da biblioteca espectral bem como os mais representativos da área em estudo. Portanto, a mesma biblioteca foi utilizada para a aplicação do *MESMA* sobre a imagem de 1987.

3.5. Avaliação dos Resultados

As frações resultantes da aplicação do *MESMA* sobre as imagens Landsat TM de 2006 2001 foram avaliadas utilizando-se como referência as imagens Quickbird e Ikonos, respectivamente. Para a realização da validação, foram selecionadas amostras aleatórias com tamanho equivalente a 9 pixels Landsat TM (90m x 90m), a fim de minimizar os erros devido às distorções geométricas entre as imagens fração e as imagens de alta resolução espacial e à influência dos alvos vizinhos na resposta espectral de determinado pixel (POWELL et al., 2007).

Foram selecionadas 98 amostras na imagem Quickbird, e 68 na imagem Ikonos. As amostras foram classificadas através de interpretação visual e vetorização manual, para posterior comparação com as frações resultantes do *MESMA*.

A acurácia das frações e das componentes dominantes modeladas foi avaliada utilizando-se todo o conjunto de amostras, separadamente para cada data, através do cálculo do índice de exatidão global (EG) e *Kappa* (κ) (COHEN, 1960; CONGALTON, 1999), a partir da matriz de confusão. Para o cálculo da acurácia das componentes dominantes, cada amostra foi denominada como pertencendo à componente que correspondia à maior fração modelada, ou seja, se em determinada amostra a maior parte foi modelada como “solo”, então essa amostra pertence à componente solo. Como a acurácia das componentes dominantes não representam bem a acurácia das áreas heterogêneas modeladas, foi calculada também a acurácia das frações de componentes,

as quais foram agrupadas nos seguintes intervalos na matriz de confusão: 0%, 0 – 10%, 10 – 25%, 25 – 50%, 50 – 75%, 75 – 90% e 90 – 100% (Dennison e Roberts, 2003a).

Foi realizado ainda um teste estatístico Z para avaliar individualmente os valores de $Kappa$ obtidos, a fim de verificar se os resultados foram significativamente melhores que uma classificação casual, através da seguinte equação:

$$Z_{calc} = \frac{k}{\sqrt{\sigma_k^2}} \quad (4)$$

em que k representa o valor da estimativa do índice $Kappa$ e o denominador (dentro do radical) a estimativa de sua variância⁷. O objetivo é testar as seguintes hipóteses: H_0 : a classificação se deu devido ao acaso e H_a : não H_0 , ou seja, não há evidências para se afirmar que os resultados obtidos não foram significativamente melhores que em uma classificação casual. Para que se rejeite H_0 , o valor de Z_{calc} deve ser maior ou igual ao valor de referência de Z . Esse valor, para um nível de significância de 5%, é aproximadamente igual a 1,96.

3.6. Análise do processo de impermeabilização na bacia hidrográfica urbana do São Raimundo

Considerando que o aumento da impermeabilização da superfície é um dos grandes responsáveis pelo aumento, em frequência e magnitude, das cheias urbanas (TUCCI e BERTONI, 2003), quantificar tal impermeabilização nas bacias hidrográficas é fundamental para que planejadores possam definir taxas de ocupação do solo nos centros urbanos, a fim de minimizar ou até evitar a ocorrência de catástrofes ambientais.

Dentre outros parâmetros fundamentais aos modelos hidrológicos de precipitação-vazão, os quais são capazes de prognosticar os impactos potenciais e simular as medidas de controle possíveis, o nível de impermeabilização e a declividade do terreno são características físicas que influenciam diretamente na velocidade de escoamento da água em um evento de chuva (CAMPANA e TUCCI, 1999). Quanto maior a declividade e

⁷ As equações para o cálculo das estimativas do índice $Kappa$ e da variância do $Kappa$ podem ser encontradas em Hudson e Ramm (1987).

maior o nível de impermeabilização, mais rapidamente a água é drenada para os fundos de vale, o que pode ocasionar cheias e transbordamentos em determinados pontos.

Como o objetivo deste trabalho não é quantificar a vazão na bacia hidrográfica urbana, e sim qualificar a ocupação e o processo de impermeabilização das microbacias ao longo do tempo, não foram aplicados modelos hidrológicos. Os dados de impermeabilização e declividade foram utilizados a fim de gerar uma escala de níveis de escoamento superficial em um evento de chuva homogeneamente distribuído, a qual inicia com mínima impermeabilização e mínima declividade (escoamento superficial lento) até máxima impermeabilização e máxima declividade (escoamento superficial rápido). Para tal, não foi considerado o escoamento através do sistema de drenagem instalado (canais artificiais e galerias), uma vez que grande parte da cidade não é beneficiada por este serviço e o órgão competente não disponibiliza esses dados espacializados.

As frações “superfícies impermeáveis” dos anos de 1987 e 2006, resultantes da aplicação do *MESMA*, foram utilizadas com a finalidade de delimitar e quantificar essas áreas. Para isso, foi selecionada como área de estudo a bacia hidrográfica urbana do São Raimundo, que foi dividida em microbacias, para as quais foi calculada a área impermeabilizada (em km²) e a declividade média (em %).

A área impermeabilizada foi obtida através a multiplicação da porcentagem modelada desta componente em determinado pixel pelo tamanho da área deste pixel, que no caso das imagens analisadas, é de 900m² (30m x 30m). Posteriormente, tais valores foram somados de acordo com a microbacia à qual pertencem, gerando assim a área impermeabilizada total da microbacia. Sabendo-se a área total da microbacia, foi possível estimar a porcentagem de área impermeabilizada da mesma.

A divisão em microbacias foi realizada através do módulo *Hydrology* do software Arc GIS 9.2, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área urbana de Manaus cedido pela Prefeitura Municipal de Manaus, com resolução espacial de 20 metros, gerado a partir de isolinhas com equidistância de 5 metros. A declividade média de cada microbacia foi calculada em porcentagem, através do mesmo MDE.

A figura 3.6 apresenta o fluxograma com as principais etapas abordadas na análise de impermeabilização da bacia do São Raimundo.

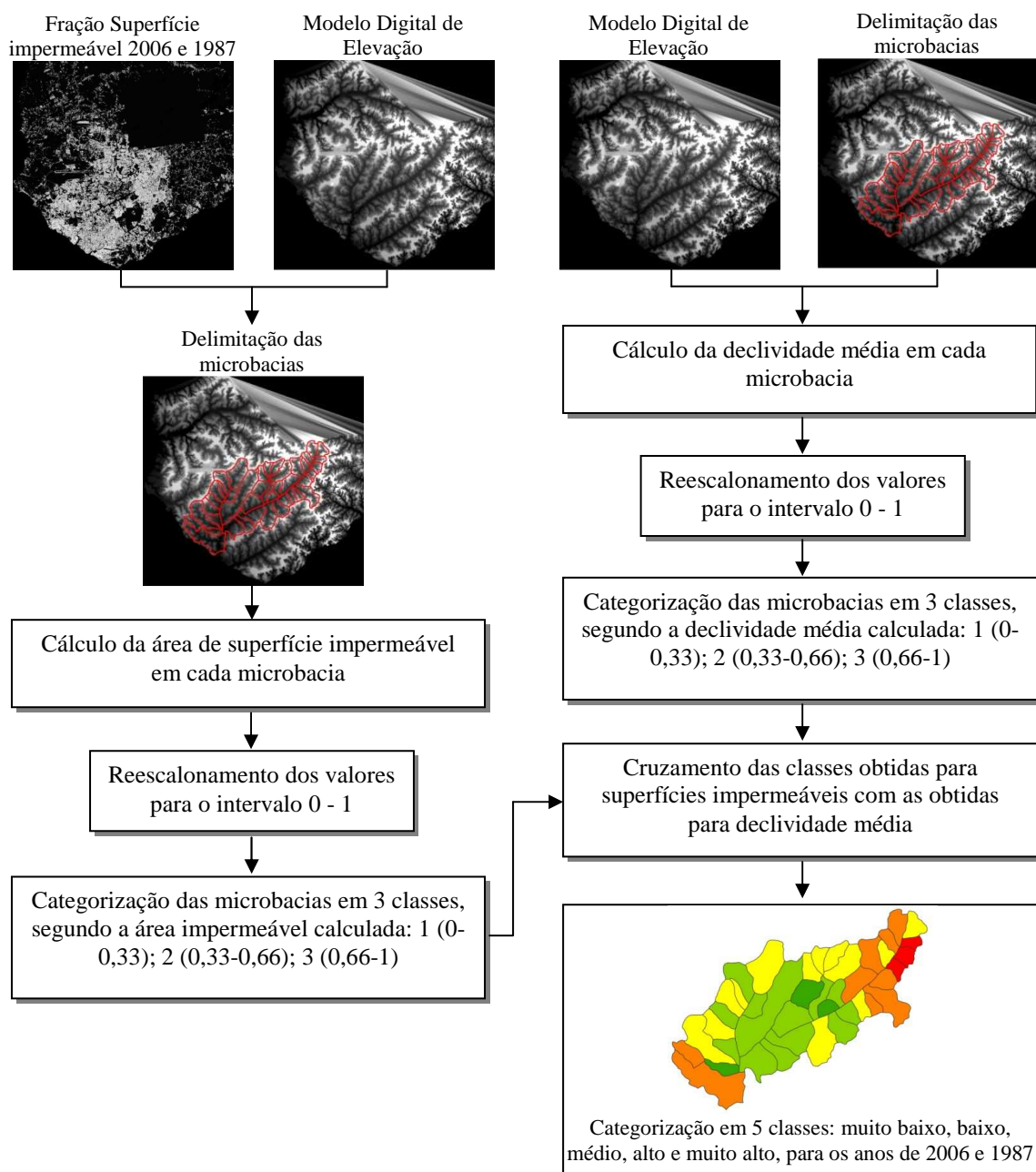


Figura 3.6 – Fluxograma metodológico de delimitação das microbacias e qualificação das mesmas em 5 classes , segundo seus níveis de impermeabilização e declividade.

Para definição da escala de escoamento superficial, a bacia foi subdividida em microbacias. A hierarquização da bacia em microbacias partiu da rede principal de fluxos d'água e nascentes que se articulam em sub-bacias de 2ª. e 3ª ordem

(CHRISTOFOLETTI, 1980), cuja linha divisória da bacia corta perpendicularmente o eixo das curvas que contornam os topos das elevações e seguem encosta abaixo pelo eixo das convexidades do terreno (COELHO NETO e AVELAR, 2002). Algumas microbacias, cujas áreas são inferiores a 1km², foram incorporadas à microbacia vizinha, a fim de evitar subestimações devido ao seu tamanho, em comparação ao tamanho das demais.

A declividade média (%) e a porcentagem de superfície impermeável foram calculadas para cada uma das microbacias. Os valores obtidos foram posteriormente reescaladas para o intervalo 0 a 1 a partir de uma equação linear, cujo valor 0 refere-se ao mínimo valor obtido para declividade média e superfície impermeável, e o valor 1 ao máximo.

Reescalados os valores, os mesmos foram divididos em três intervalos iguais⁸ e classificados, em três categorias, sendo: 1, valores entre 0 e 0,33; 2, valores entre 0,33 e 0,66; e 3, valores entre 0,66 e 1, as quais referem-se aos níveis baixo, médio e alto de velocidade de escoamento superficial, respectivamente. A partir dessas categorias foi gerada a tabela 6, cruzando os valores obtidos de superfície impermeável com os valores obtidos de declividade média. Com o cruzamento dos dados de declividade e superfícies impermeáveis, obtiveram-se as classes finais de níveis de escoamento superficial, sendo estas: “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”. Na classe “muito baixo” são encontradas as velocidades mínimas de escoamento e na classe “muito alto” as máximas.

Tabela 3.1 – Cruzamento dos intervalos obtidos para superfícies impermeáveis e declividade média, gerando 5 níveis de escoamento superficial.

		Área de superfície impermeável		
		1 (0 – 0,33)	2 (0,33 – 0,66)	3 (0,66 – 1)
Declividade média	1 (0 – 0,33)	Muito baixo	Baixo	Médio
	2 (0,33 – 0,66)	Baixo	Médio	Alto
	3 (0,66 – 1)	Médio	Alto	Muito alto

⁸ Não existem estudos relacionando apenas as variáveis declividade e impermeabilização que demonstrem quais valores para essas variáveis indicam baixa, média e alta velocidade de escoamento superficial; em função disso, neste trabalho os valores foram divididos em três intervalos iguais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aplicação do MESMA

As imagens da área de estudo, co-registradas, normalizadas radiometricamente e resultantes da aplicação da máscara de água e nuvens, conforme descrito na metodologia, são apresentadas na figura 4.1.

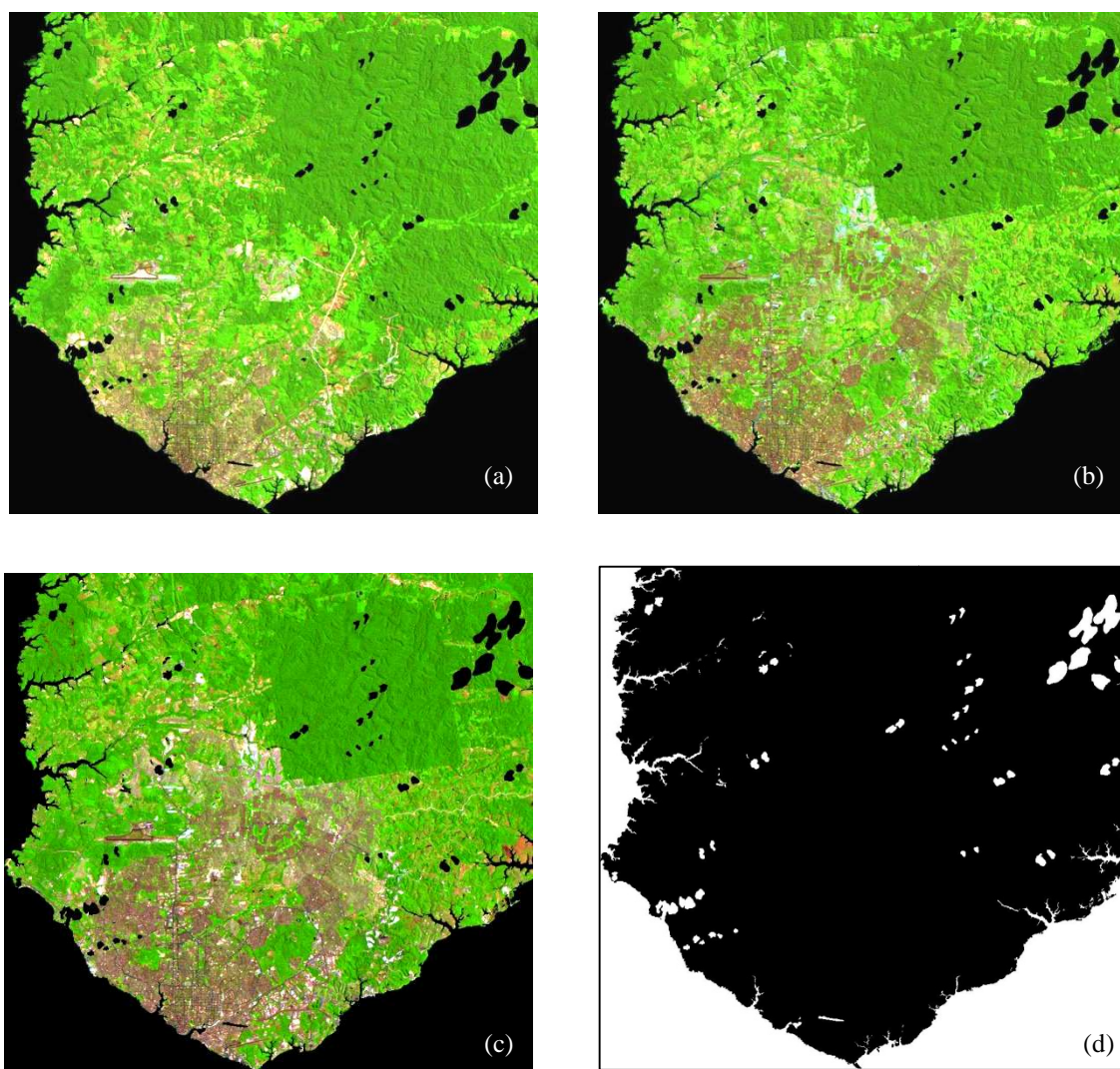


Figura 4.1 – Imagens Landsat TM (composição R5 G4 B3) da área de estudo, dos anos de (a)1987, (b) 2001 e (c) 2006, e (d) máscara de corpos d’água, nuvens e sombras de nuvens.

A primeira seleção de componentes (figura 3.5), realizada através da aplicação do *Pixel Purity Index* sobre a imagem referência (Landsat TM 2006), identificou 1332 pixels como sendo extremos, ou seja, puros. Depois de inspecionados através da imagem de

alta resolução espacial (1ª seleção de componentes), e da aplicação das métricas EAR (*Endmember Average RMSE*), MASA (*Minimum Average Spectral Angle*) e COB (*Count-based Endmember Selection*) (2ª seleção de componentes) foram selecionados para comporem a biblioteca espectral de entrada do *MESMA*, 142 espectros, sendo 65 de superfícies impermeáveis, 10 de vegetação seca, 16 de solo e 51 de vegetação verde, conforme apresentado na figura 4.2.

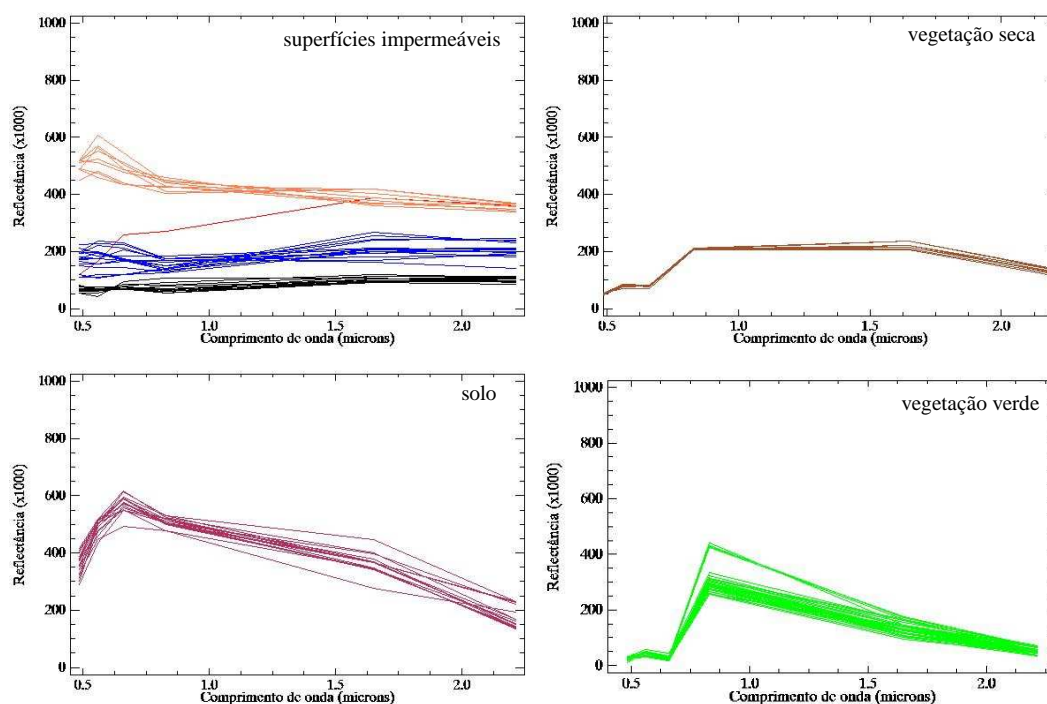


Figura 4.2 – Espectros selecionados para compor a primeira biblioteca espectral do *MESMA*.

Após a aplicação do *MESMA* sobre as imagens de 2006 e 2001, com a biblioteca composta por todos os 142 espectros independentemente dos valores obtidos das métricas, foi verificado que as componentes com menores valores de EAR, parâmetro que expressa quão representativo determinado espectro é de sua classe, não foram capazes de modelar algumas regiões da imagem. O mesmo foi observado por Powell (2007), e ocorre em função do pressuposto de que um espectro ser representativo de sua classe não necessariamente representa que o mesmo é representativo dos materiais que compõem a cena em estudo. Por isso, para a seleção final de espectros, procurou-se

evitar apenas a confusão entre as classes de componentes⁹, selecionando-se os espectros que resultaram em menores valores de out_COB, que modelaram uma maior fração de pixels nas imagens de 2006 e 2001 e geraram valores baixos de erro. Como resultado, foram selecionados (3ª seleção de componentes) 30 espectros para compor a biblioteca espectral final (figura 4.3).

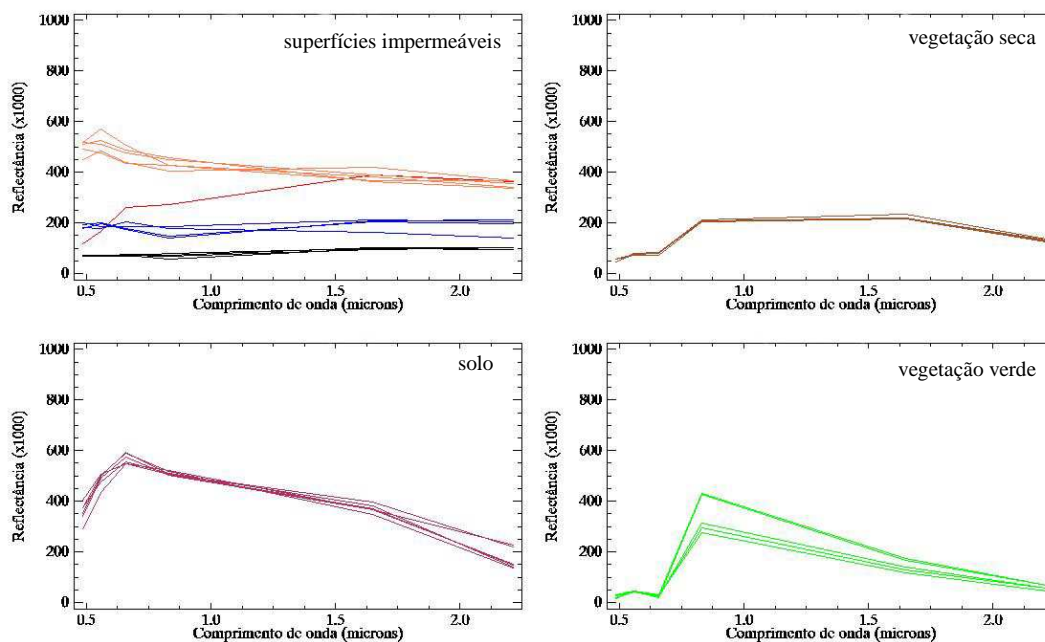


Figura 4.3 – Espectros selecionados para compor a biblioteca espectral final do MESMA.

As combinações entre as componentes são apresentadas na tabela 2. Ao todo, foram selecionados 5 espectros de vegetação seca, 14 de superfícies impermeáveis, 6 de solo e 5 de vegetação. O aplicativo *VIPER Tools* permite como entrada o número de bibliotecas espectrais quantas forem as componentes desejadas para o modelo. Como somente uma biblioteca espectral foi criada, no caso dos modelos de 3 componentes inseriu-se a biblioteca espectral final 2 vezes, e 3 vezes no caso dos modelos com 4 componentes. Isso possibilita todas as combinações possíveis entre componentes, bem como a repetição do mesmo componente por até 3 vezes. O problema deste tipo de abordagem é o número final de modelos, uma vez que em uma biblioteca espectral

⁹ Entende-se por “classes de componentes” as classes nas quais as imagens serão modeladas, sendo estas: superfícies impermeáveis, vegetação (seca e verde) e solo.

formada por 30 componentes o número de modelos seria igual a 27000¹⁰, o que torna o tempo de processamento muito alto. Portanto, para os modelos formados por 4 componentes, foram selecionados apenas os espectros que modelaram a maior quantidade de pixels através de modelos com 2 e 3 componentes, o que resultou em uma biblioteca espectral de 18 componentes, sendo 3 de vegetação verde, 2 de vegetação seca, 9 de superfícies impermeáveis e 4 de solo.

Tabela 4.1 – Combinações entre componentes utilizadas nos modelos aplicados (vs: vegetação seca; vv: vegetação verde; imp: superfícies impermeáveis).

2 componentes (30 modelos)	3 componentes (900 modelos)	4 componentes (5832 modelos)
vs + sombra	vs + vv + sombra	vv + imp + imp + sombra
vv + sombra	vs + imp + sombra	solo + imp + imp + sombra
imp + sombra	vs + solo + sombra	vs + imp + imp + sombra
solo + sombra	vv + imp + sombra	solo + vv + imp + sombra
	vv + solo + sombra	solo + vs + imp + sombra
	solo + imp + sombra	vv + solo + vn + sombra
	imp + imp + sombra	vv + vs + imp + sombra

A tabela 3 apresenta a quantidade de pixels modelados em cada uma das imagens a partir da aplicação da biblioteca espectral final.

Tabela 4.2 – Quantidade de pixels, exceto máscara de água, modelados através dos modelos com 2, 3 e 4 componentes (tabela 2) nas imagens de 1987, 2001 e 2006.

imagem	nº de componentes	nº de pixels modelados	porcentagem de pixels modelados	total de pixels modelados na imagem
Landsat TM 2006	2 componentes	706211	70,1 %	97,7%
	3 componentes	276005	27,4 %	
	4 componentes	2402	0,2 %	
Landsat TM 2001	2 componentes	775518	77,0 %	98,8%
	3 componentes	210358	20,9 %	
	4 componentes	9032	0,9 %	
Landsat TM 1987	2 componentes	851676	84,5 %	99,2%
	3 componentes	145027	14,4 %	
	4 componentes	2916	0,3 %	

¹⁰ Número de modelos resultante das combinações possíveis entre 3 bibliotecas de 30 componentes cada.

Para a geração dos mapas finais de fração das componentes (figura 4.4), as frações de cada componente da cobertura do solo, resultantes da aplicação de modelos com 2, 3 e 4 componentes, foram somadas. As componentes vegetação verde e vegetação seca foram unidos em uma única classe para melhor visualização dos mapas de fração, uma vez que a porção de vegetação seca não é significativa.

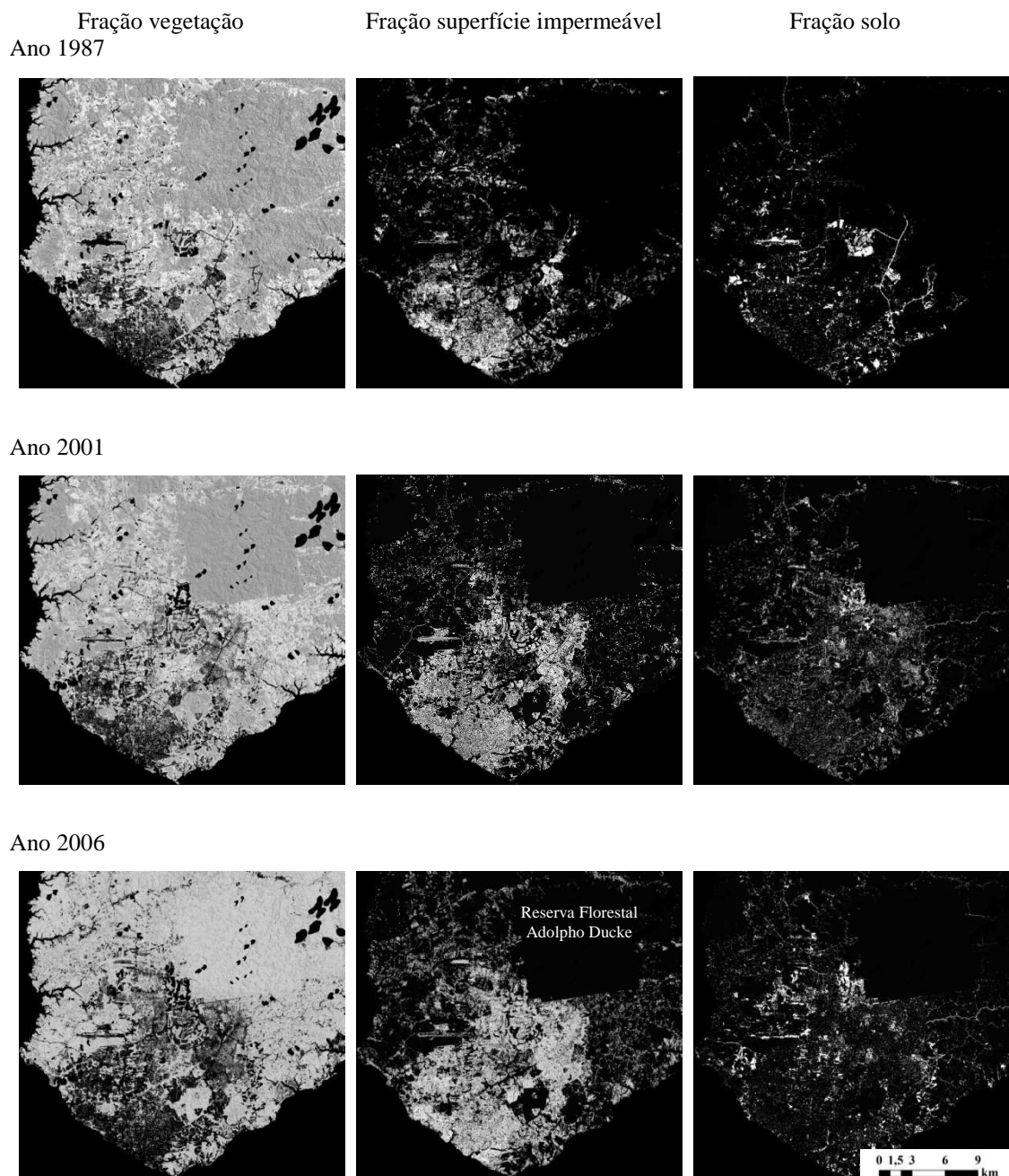


Figura 4.4 – Imagens fração geradas a partir da aplicação do MESMA.

As matrizes de confusão, comparando as componentes dominantes extraídas a partir de interpretação visual das imagens de alta resolução espacial de 2006 e 2001 (imagem referência) às frações obtidas pelo *MESMA* nas imagens Landsat da mesma data (imagem modelada), são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4.3 – Matrizes de confusão entre as componentes dominantes da imagem referência e as componentes dominantes da imagem modelada.

Ano 2006					
Componente dominante na imagem modelada	Componente dominante na imagem referência				
	vegetação	superfícies impermeáveis	solo	não modelado	erro de comissão
vegetação	56	1	4	0	0,08
superfícies impermeáveis	0	35	0	0	0
solo	0	0	2	0	0
não modelado	0	0	0	0	0
erro de omissão	0	0,03	0,67	0	Total: 98

Ano 2001					
Componente dominante na imagem modelada	Componente dominante na imagem referência				
	vegetação	superfícies impermeáveis	solo	não modelado	erro de comissão
vegetação	30	0	2	0	0,06
superfícies impermeáveis	2	31	0	0	0,06
solo	0	0	3	0	0
não modelado	0	0	0	0	0
erro de omissão	0,06	0	0,40	0	Total: 68

A classe dominante foi corretamente modelada em 93 das 98 amostras coletadas na imagem de 2006, representando exatidão global de 95% e κ igual a 0,90. Já na imagem de 2001, em 61 das 64 amostras a classe dominante foi corretamente modelada, representando exatidão global de 94% e κ igual a 0,89. O índice κ obtido para as duas datas é classificado como excelente por Landis e Koch (1977). Segundo Foody (2002), uma boa classificação deve apresentar exatidão global superior a 85%, como é o caso dos resultados obtidos. O teste Z indicou que para ambas as datas os resultados obtidos foram melhores que em uma classificação casual, ou seja, foi rejeitado H_0 a um nível de 5% de significância.

É possível observar nas duas datas analisadas um alto erro de omissão na classe solo, a qual foi modelada como sendo vegetação. Analisando-se os dados, verificou-se que apesar de na interpretação visual das imagens de alta resolução espacial os pixels das amostras terem sido identificados como solo exposto, é possível que os mesmos sejam

cobertos por vegetação seca, como pôde ser visualizado na resposta espectral destes pixels nas imagens Landsat. Portanto, deve-se considerar a possibilidade de erros na interpretação das imagens de alta resolução espacial, utilizadas como referência. Similarmente, algumas áreas de sombreamento devido à presença de prédios altos foram interpretadas visualmente como sendo vegetação, o que pode ter sido responsável pelo erro de omissão desta componente na imagem do ano de 2001. O mesmo foi observado por Powell et al. (2007). Já na imagem de 2006 ocorreu o inverso, ou seja, pixels identificados como superfícies impermeáveis foram modelados como sendo vegetação. Em posteriores verificações foi observado que algumas áreas alagadas foram erroneamente interpretadas como superfícies impermeáveis, devido à sua semelhança com asfalto. A amostra em questão é um desses casos.

Na tabela 5, são apresentadas as matrizes de confusão que comparam os intervalos de frações modeladas, a fim de mensurar sua acurácia. Ao todo, foram comparadas 294 frações modeladas na imagem de 2006 e 204 na imagem de 2001.

Tabela 4.4 – Matrizes de confusão entre as frações de cobertura da imagem referência e as frações de cobertura da imagem modelada.

Ano 2006		Fração de cobertura na imagem referência (Quickbird)							erro de comissão
		0%	0-10%	10-25%	25-50%	50-75%	75-90%	90-100%	
Fração de cobertura na imagem modelada	0%	91	22	4	2	0	0	0	0,24
	0-10%	11	20	9	1	0	0	0	0,51
	10-25%	2	0	12	3	1	0	0	0,33
	25-50%	0	3	2	13	3	0	0	0,38
	50-75%	0	0	0	3	17	4	3	0,37
	75-90%	0	0	0	1	3	8	3	0,47
	90-100%	0	0	0	0	2	5	46	0,13
	erro de omissão	0,13	0,56	0,56	0,43	0,35	0,53	0,12	Total: 294

Ano 2001		Fração de cobertura na imagem referência (IKONOS)							erro de comissão
		0%	0-10%	10-25%	25-50%	50-75%	75-90%	90-100%	
Fração de cobertura na imagem modelada	0%	51	7	3	0	1	0	0	0,18
	0-10%	10	12	2	1	0	0	0	0,52
	10-25%	4	4	14	6	0	1	0	0,52
	25-50%	0	1	5	18	2	0	0	0,31
	50-75%	0	0	0	3	13	5	0	0,38
	75-90%	0	0	0	0	2	5	8	0,67
	90-100%	0	1	0	0	2	1	22	0,15
	erro de omissão	0,22	0,50	0,42	0,36	0,35	0,58	0,27	Total: 204

A exatidão global obtida na imagem de 2006 foi de 70,41% e κ igual a 0,62. Já na imagem de 2001, a exatidão global foi de 66,18% e κ igual a 0,59. Os valores de Kappa obtidos são considerados muito bons segundo a classificação de Landis e Koch (1977). Esses resultados apontam que, embora a fração dominante tenha sido corretamente modelada, grande parte das demais frações foi sub ou super estimada, com exceção aos intervalos 0% e 90-100%, os quais apresentaram menores erros de omissão e comissão. Neste caso, o teste Z também indicou que para ambas as datas os resultados obtidos foram melhores que em uma classificação casual, ou seja, foi rejeitado H_0 a um nível de 5% de significância.

Apesar dos altos erros de comissão e omissão, é possível observar que os valores obtidos estão em intervalos próximos ao valor real da fração, ou seja, uma fração com 10-25% de determinada componente não foi modelada como contendo 50-75%, 75-90% ou 90-100% desta componente, mas pode ter sido modelada como 0%, 0-10% ou 25-50%, como pode ser observado nos dados sombreados com a cor cinza. Os dados sombreados em vermelho são exceções, mas representam apenas 1,47% das frações analisadas. A análise dos dados sem agrupá-los em intervalos de frações possibilitou quantificar a porcentagem média de erro de fração, a qual resultou em 17% para mais ou para menos.

4.2. O processo de expansão urbana em Manaus

A distribuição das componentes nas diferentes datas sugere coerência nas frações obtidas. O ano de 1987 apresenta grandes áreas com concentração de solo exposto, enquanto que em 2006 as frações desta componente ocupam áreas menores, e encontram-se menos concentradas e mais dispersas, o que pode estar associado às altas taxas de ocupação e conseqüente indisponibilidade de grandes áreas vagas para novos empreendimentos ou novas obras de infra-estrutura. É provável que em função disso que o mapa fração de solo de 2006 (figura 4.4) apresentou níveis de cinza mais escuros em relação ao de 1987, o que representa valores de fração menores.

A perda de cobertura vegetal ocorrida entre os anos de 1987 e 2006, e um incremento proporcional das áreas impermeáveis, também pode ser visualizado nas frações de

vegetação e superfícies impermeáveis. Um possível eixo de expansão da ocupação no sentido sudoeste-nordeste, no exato sentido e localização das principais bacias urbanas de Manaus, São Raimundo e Educandos, pode ter sido o responsável pela substituição da cobertura vegetal por superfícies impermeabilizadas. Segundo Oliveira (2008), os igarapés foram os vetores da expansão urbana em Manaus, o que pode explicar tal eixo visualizado na imagem-fração de superfícies impermeáveis. Tal expansão foi limitada pelos limites sul e oeste da Reserva Florestal Adolpho Ducke¹¹, cujos limites são realçados na fração de superfícies impermeáveis do ano de 2006 em relação ao de 1987 (figura 4.5).

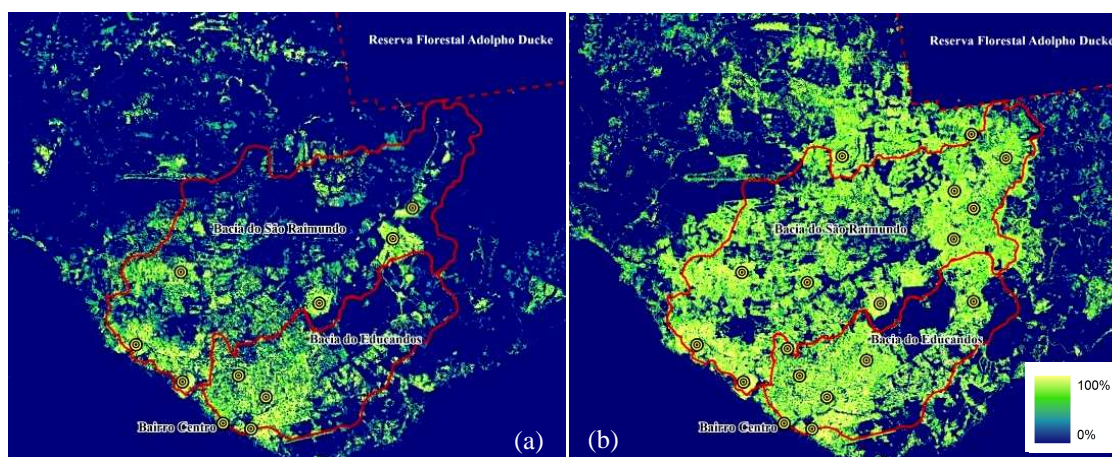


Figura 4.5 – Fração de superfície impermeável em (a)1987 e (b) 2006, com os pontos indicando as centralidades urbanas e a delimitação das duas principais bacias hidrográficas urbanas e da Reserva Floresta Adolpho Ducke.

Ainda em relação à impermeabilização da superfície, expressa na figura 4.5, é possível observar mais aglomerações de superfícies impermeáveis em 2006 em relação a 1987. A medida que a área urbana foi se expandindo, foram sendo criadas novas centralidades¹², que reestruturaram a paisagem urbana. Essa tendência de

¹¹ A reserva Florestal Adolpho Ducke localiza-se na zona norte do município de Manaus, na área de transição (Prefeitura Municipal de Manaus, 2002) de Manaus, compreendendo 100km². Sua delimitação pode ser conferida na figura 5.

¹² Neste trabalho, a palavra “centralidade” expressa a definição de “centro”, que significa o processo de centralização de atividades, ou seja, convergência de elementos aglutinadores que demandam concentração de fatores fundamentais (comércio, serviços, lazer, etc.) para a manutenção da sociedade em um espaço determinado (SPOSITO, 2004).

descentralização¹³ e conseqüente (re)centralização, expressando concentrações populacionais multicêntricas, que amplia a espacialização intra-urbana, foi apontada por Silva (2001), e indica um fenômeno observado por diversos estudiosos da geografia urbana como uma característica própria da intensificação do processo de urbanização no século XX (OLIVEIRA JÚNIOR, 2008).

Ocupações mais homogêneas e densas apresentam menor nível de mistura espectral nas imagens de satélite, ao contrário das ocupações mais dispersas e heterogêneas. Isso significa que, o surgimento de novas centralidades, onde a heterogenia de uso do solo (antes menor em função da concentração e segregação dos usos) se dispersa e ocupa novos lugares, pode gerar maior nível de mistura espectral. Esse pode ser um dos fatores que levou à obtenção de melhor resultado da aplicação do *MESMA* na imagem de 1987 em relação às demais datas, bem como o fato de 84,5% desta ter sido modelada através de modelos com 2 componentes.

Não obstante a intensa impermeabilização da bacia hidrográfica do São Raimundo, conseqüente da expansão da ocupação urbana, no caso da cidade de Manaus, essa distribuição espacial da fração de superfícies impermeáveis retrata o problema de exclusão social vivenciado por grande parte de população nos últimos anos (SOUZA e PINHEIRO, 2009).

A alta valorização imobiliária nas zonas sul e centro-sul (anexo a) pode ter sido a grande responsável pela expulsão da população de baixa renda dessas áreas, que acabou tendo que procurar alternativas menos caras de habitação, localizadas em áreas distantes das centralidades existentes. A alternativa foi expandir a ocupação na direção em que estradas implantadas permitiam acesso, sendo estas, à época, as avenidas Grande Circular e Cosme Ferreira (figura 3.3), que percorrem justamente o sentido jusante-montante da bacia do São Raimundo. O resultado foi a ocupação informal e densa das áreas periféricas, de grande fragilidade ambiental em função da topografia acidentada e da presença de diversas nascentes, de infraestrutura deficiente e desarticuladas do contexto urbano (SILVA Jr., 2007).

¹³ Em Manaus, a primeira descentralização ocorreu a partir do bairro Centro, primeiro bairro da cidade e que por muito tempo deteve o monopólio comercial, hoje disperso em várias centralidades.

As zonas mais valorizadas de Manaus atraíram a atenção de investidores, que detêm determinadas áreas e as mantêm inocupadas, especulando o mercado imobiliário (SOUZA e PINHEIRO, 2009). O surgimento de vazios urbanos em função da especulação¹⁴ imobiliária acarreta na subutilização da infraestrutura urbana e no encarecimento dos serviços públicos (transporte, iluminação, água e esgoto). Essa elevação nas taxas de serviços urbanos, por sua vez, impossibilita que grande parte da população periférica legalize sua moradia, elevando assim as taxas de informalidade ocupacional, que por sua vez aumenta ainda mais o custo dos serviços urbanos (GONÇALVES, 2002). Assim, a cidade de Manaus, bem como outras metrópoles e grandes cidades no Brasil (MARICATO, 2000), caracterizou-se como um espaço de exclusão, onde ficam evidentes as desigualdades sociais na configuração da ocupação.

4.3. Análise da impermeabilização na bacia hidrográfica urbana do São Raimundo nos anos 1987 e 2006

As microbacias da bacia hidrográfica do São Raimundo, delimitadas a partir do Modelo Digital de Elevação, são apresentadas na figura 4.6.

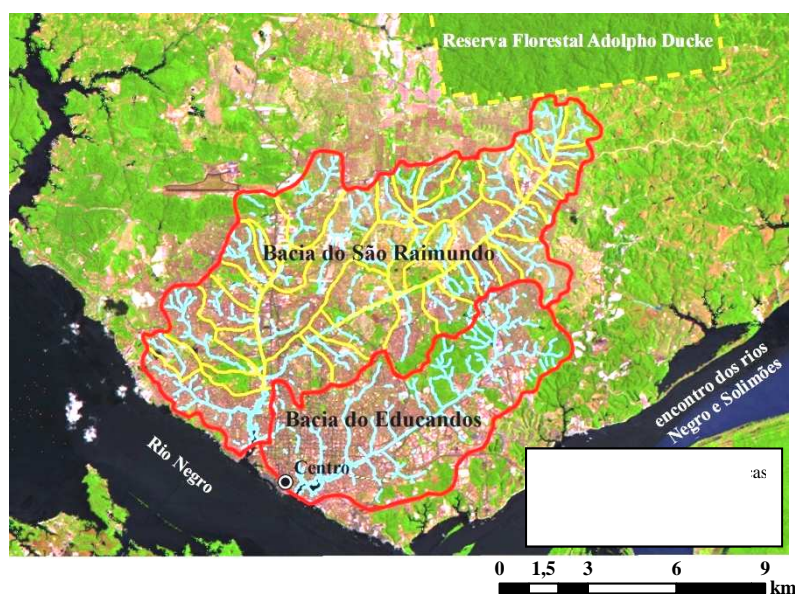


Figura 4.6 – Subdivisão da bacia hidrográfica do São Raimundo em microbacias.

¹⁴ O significado de especulação adotado neste trabalho foi o proposto por Kandir, 1984.

A análise dos resultados obtidos, apresentados na figura 4.7, permite interpretar quais microbacias possuem um escoamento superficial mais rápido, fazendo com que as águas pluviais cheguem mais rapidamente ao curso principal do igarapé do São Raimundo, podendo acarretar cheias e transbordamentos nos picos de precipitação.

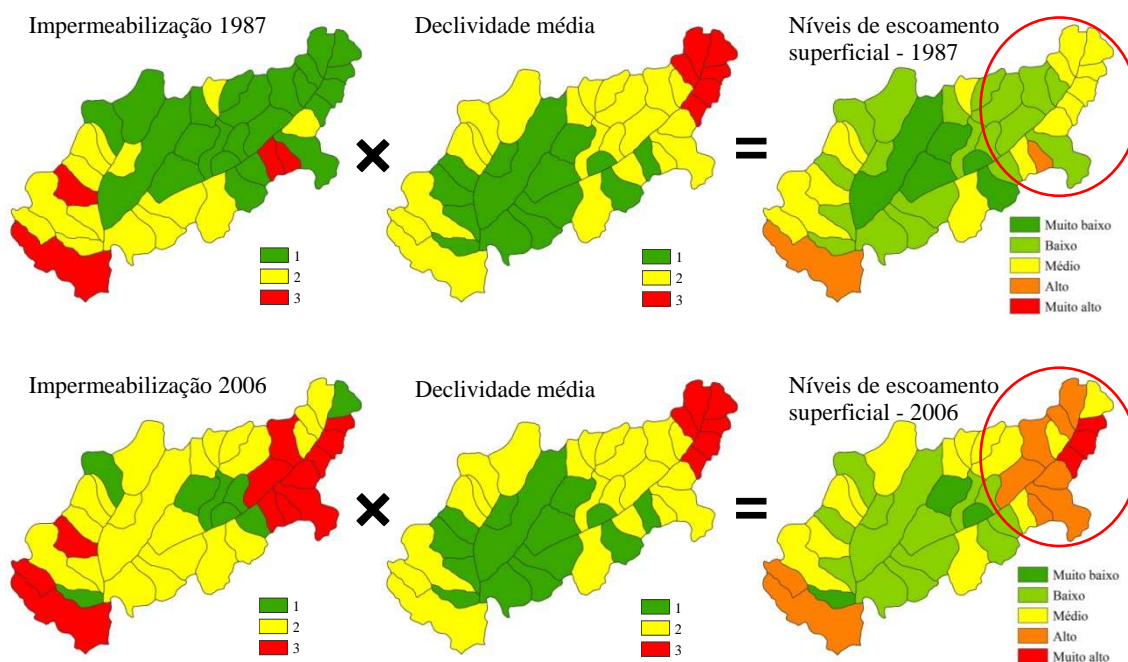


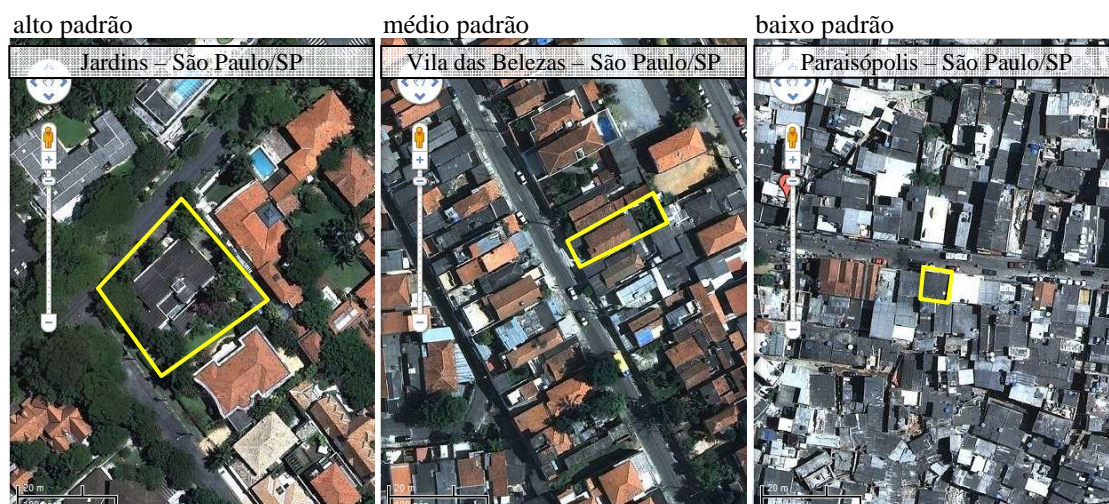
Figura 4.7 – Níveis de escoamento superficial obtidos a partir do cruzamento da porcentagem de impermeabilização em 1987 e 2006 com a declividade média, em cada microbacia.

Um escoamento superficial mais rápido sugere um maior risco de enchentes. Uma vez que toda a água da chuva que chega à superfície uma bacia hidrográfica e escoar por esta, drena para um mesmo fundo de vale (salvo exceções geomorfológicas específicas, que não é o caso da referida bacia), e ao longo do curso pode encontrar vários pontos de amortecimento e natural inundação – *wetland* – que, devido aos aterros, assoreamento, estrangulamento por pontilhões e pontes e, principalmente excessiva impermeabilização, tem seus limites de inundação modificados e ampliados a pontos antes não atingidos (TUCCI e BERTONI, 2003). Portanto, é importante considerar, no planejamento de sua ocupação, a área como um conjunto, e não cada divisão administrativa como uma unidade isolada, sendo que as divisões administrativas, no caso da cidade em estudo, não respeitam os limites físicos das bacias.

Comparando-se a impermeabilização de 1987 com a de 2006 (figura 4.7) nota-se o aumento de superfícies impermeáveis em direção à montante da bacia hidrográfica, sobre áreas cuja declividade acentuada deveria resultar em um planejamento que previsse taxas de ocupação e adensamento menores. Esse processo de periferização tem como causa originária a alta valorização imobiliária das zonas sul e centro-sul ocorrida na última década, que deslocou as ocupações de baixa renda às áreas menos valorizadas (periferia), conforme já citado na seção anterior, sendo estas de ocupação dificultosa devido à distância às áreas centrais e às características morfológicas do terreno. É nessas áreas periféricas onde se encontram grande parte das nascentes dos afluentes do São Raimundo e o limite da Reserva Florestal Adolpho Ducke, a qual deveria se conectar aos demais fragmentos florestais urbanos nas zonas sul e centro-sul através de corredores ecológicos, garantindo fluxo gênico entre estes (Prefeitura Municipal de Manaus, 2002) e melhorando a qualidade do conforto ambiental urbano. Portanto, tais áreas, circuladas em vermelho na figura 4.7, são áreas críticas que merecem um cuidado especial no planejamento urbano no sentido de reverter as tendências de crescimento das taxas de impermeabilização para não frustrar os objetivos legalmente estabelecidos de interligação dos corredores ecológicos.

Tomando-se como base o prescrito no Plano Diretor Urbano e Ambiental de Manaus (Prefeitura Municipal de Manaus, 2002) pode-se sugerir uma contradição com as necessidades apontadas. A delimitação administrativa que agrega áreas urbanas contíguas e homogêneas, destinada ao planejamento e gestão da cidade, não considera os limites físicos das bacias hidrográficas e nem a fragilidade ambiental das áreas de nascente e de topografia acidentada. As Macrounidades Urbanas, como são denominadas essas delimitações, são subdivididas em UES – Unidades de Estruturação Urbana (figura 4.8). Para cada UES são definidas leis de uso e ocupação específicas no Plano Diretor, incluindo as respectivas taxas de ocupação, que implicam diretamente nos níveis de impermeabilização.

A probabilidade de haver um incremento da área impermeável inversamente proporcional ao tamanho do lote pode ser sugerida a partir de uma simples comparação entre imagens de alta resolução espacial cobrindo áreas residenciais de diferentes padrões construtivos. Na figura 4.9, são apresentados recortes extraídos do Google Maps¹⁵ de alguns bairros das capitais dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Amazonas. Os bairros foram selecionados a partir dos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH)¹⁶, buscando incorporar um bairro de baixo, um de médio e um de alto IDH. Assumiu-se o IDH como sendo um indicativo da classe social à qual os moradores de tal bairro pertencem. A partir desse primeiro indicativo, as áreas selecionadas foram visualizadas para que, a partir de variáveis como tamanho da edificação, tipo de cobertura (material, formato), organização e tamanho dos lotes (PINHO, 2005), fosse selecionada uma área representando a classe alta, uma a classe média e uma última, a baixa, para cada uma das cidades selecionadas. As áreas circulares em amarelo representam os prováveis limites dos lotes, e dentro dos mesmos é possível visualizar a proporção de área permeáveis em relação à área construída. Embora não seja possível afirmar esta relação como regra para todas as cidades brasileiras, nas amostras demonstradas é perceptível que quanto menor o lote maior a taxa de impermeabilização do mesmo.



¹⁵ Disponível em <www.googlemaps.com.br>. Acesso em 20 jun 2010.

¹⁶ Os Índices de Desenvolvimento Humano foram obtidos a partir dos Atlas de Desenvolvimento Humano elaborados para as cidades de São Paulo (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2008), Belo Horizonte (PNUD, 2006a) e Manaus (PNUD, 2006b).



Figura 4.9 – Recortes em imagens de alta resolução espacial demonstrando diferentes taxas de impermeabilização dos lotes na área urbana das cidades de São Paulo-SP, Belo Horizonte-MG e Manaus-AM, com prováveis limites de lotes circulados em amarelo, exemplificando a relação entre tamanho do lote e taxa de impermeabilização.

Fonte – Google Maps, 2010.

Ao observar a figura 4.10 e, comparando-a aos dados apresentados na figura 4.7, verifica-se que a relação entre IDH, tamanho do lote e conseqüente taxa de impermeabilização parece ser uma realidade para a cidade de Manaus. As Unidades de Desenvolvimento Humano que possuem menores valores de IDH concentram-se, em grande parte, na região ocupada pelas maiores taxas de impermeabilização, como demonstrado na área circulada em azul, coincidente com a área circulada na figura 4.7.

Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, 2000
UDHs dos setores urbanos

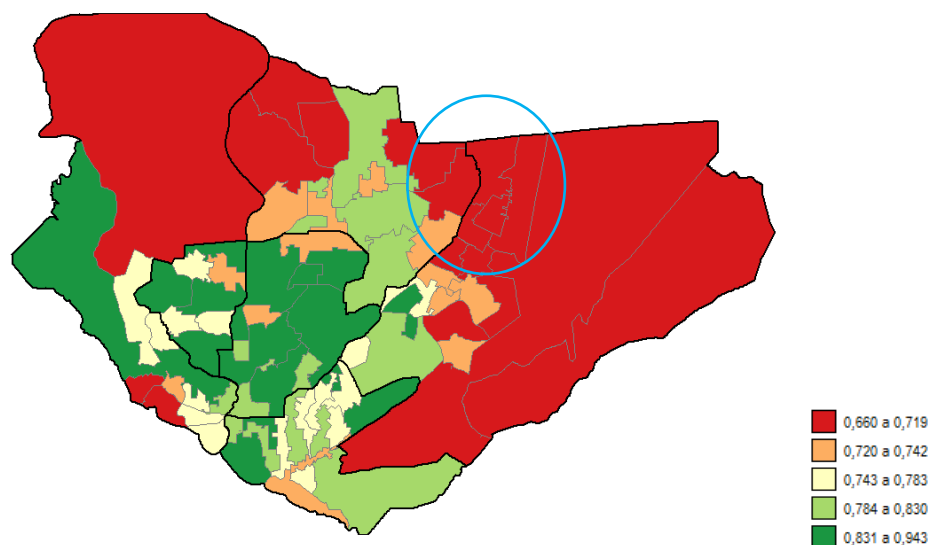


Figura 4.10 – Mapa dos Índices de Desenvolvimento Humano de Manaus, com áreas críticas, ou seja, que apresentaram níveis de escoamento superficial “altos” e “muito altos”, circuladas em azul.
Fonte: PNUD, 2006.

A macrounidade Leste comporta ainda, segundo o Plano Diretor, a implantação das AEIS (Áreas de Especial Interesse Social), destinadas à implantação de política e programas para promoção de habitação de interesse social, cujos parâmetros de ocupação são ainda menos restritivos, permitindo tanto afastamentos menores das edificações em relação aos lotes quanto a redução das margens *non aedificandi* dos cursos d’água urbanos (Prefeitura Municipal de Manaus, 2002).

As áreas à montante do Igarapé do Mindú são caracterizadas por ocupações informais (ilegais) carentes de infra-estrutura urbana geral. Apenas nos últimos anos o poder público vem promovendo melhorias, especialmente com programas de regularização fundiária. Porém o perfil socioeconômico da população local e a ilegalidade levaram o mercado imobiliário formal, que objetiva potencializar o lucro, a investir em áreas distantes destas, regularizadas, e com relevo menos acidentado, resultando daí duas formas de cidade diferente, não apenas em seu perfil socioeconômico, mas também em diferentes ocupações relacionadas a taxas de impermeabilização e topografia.

Como o planejamento urbano da cidade não relaciona perfil socioeconômico, taxas de impermeabilização e topografia, a cidade vai sendo desenhada de forma a potencializar impactos negativos, através da ocupação de microbacias com loteamentos sociais, que comportam lotes de metragem mínima e em áreas de acentuado declive, tendendo para impermeabilização próxima a 100%.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste trabalho indicaram ser possível, através das componentes vegetação, superfícies impermeáveis e solo obtidas a partir de imagens multitemporais, identificar mudanças na cobertura do solo urbano, em especial através da componente superfícies impermeáveis, a qual dá um indicativo de quais áreas estão sendo ocupadas e da taxa de adensamento das mesmas.

Uma única biblioteca espectral pode ser utilizada para modelar imagens de datas diversas, desde que estas sejam do mesmo sensor e cubram a mesma área. É indispensável calibrar a biblioteca espectral através da aplicação da mesma em uma data diversa daquela em que os espectros foram selecionados e para a qual haja a possibilidade de avaliar os resultados através de uma imagem de alta resolução espacial. A imagem de alta resolução espacial faz-se indispensável também no processo de seleção dos espectros da biblioteca, etapa fundamental para a obtenção de bons resultados. Mais esforços devem ser despendidos em análises de outras áreas urbanas, que não Manaus, para verificar a aplicabilidade desta metodologia.

Através do mapa de fração de superfícies impermeáveis, observou-se um possível eixo de expansão no sentido sudoeste-nordeste, no exato sentido e direção da bacia hidrográfica do São Raimundo. A Reserva Florestal Adolfo Ducke pode estar sofrendo pressão demográfica, uma vez que a expansão urbana já atingiu seus limites, visíveis nas frações de vegetação e superfícies impermeáveis, esta última sugerindo também o surgimento de novas centralidades.

A especulação imobiliária pode ter desempenhado papel fundamental na expansão urbana de Manaus, pois antes de ocorrer o adensamento das zonas já ocupadas, à jusante da bacia do São Raimundo, verificou-se a expansão horizontal dos limites ocupados, em direção à sua montante.

A análise do cruzamento da declividade com a taxa de impermeabilização pode ser uma importante ferramenta de planejamento do uso e ocupação do solo urbano, em especial na definição das taxas de impermeabilização, uma vez que possibilita deduzir, na escala

de microbacia, se as águas pluviais escoarão pela superfície e chegarão ao curso principal de uma bacia hidrográfica mais lenta ou rapidamente. A análise da bacia hidrográfica do São Raimundo sugeriu situação crítica às microbacias situadas à montante da bacia hidrográfica, as quais são ocupadas pela população de baixa renda e para as quais o Plano Diretor prevê adensamento ao estabelecer um tamanho mínimo para os lotes.

A relação inversamente proporcional entre tamanho do lote e taxa de impermeabilização pode ser exemplificada através de imagens extraídas de outras cidades além de Manaus, e mais estudos devem ser realizados para que se possa afirmar essa tendência para as áreas urbanas em geral.

Em função do potencial dos dados gerados na indicação de áreas críticas em relação à velocidade de escoamento superficial das águas pluviais causada pela intensa impermeabilização do solo nas microbacias urbanas, sugere-se que tais dados possam ser úteis para o planejamento do uso e ocupação do solo pelo poder público, o qual considere, como unidade deste planejamento, os limites das bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. B., SMITH, M. O., JOHNSON, P. E. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. In: PIETERS, C. M.; ENGLERT, P. A. J. **Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition**. Cambridge, England: Cambridge University Press, p. 145-165, 1993.

ADAMS, J. B.; SABOL, D. E.; KAPOV, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O. et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, v. 52, p. 137-154, 1995.

ARAÚJO, E. H. G. **Análise multi-temporal de cenas do satélite Quickbird usando um novo paradigma de classificação de imagens e inferências espaciais: estudo de caso – Belo Horizonte, MG**. 2006. 175p. (INPE-13956-TDI/1062). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. 2006.

BENTZ, C. M. **Avaliação da transformação radiométrica dos dados TM/Landsat-5 em reflectâncias**. 1990. 172 p. (INPE-5210-TDL/431). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1990. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.03.45>>. Acesso em: 05 fev. 2009.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas e sensores inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 286 p.

BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: ANNUAL JPL AIRBORNE GEOSCIENCE WORKSHOP, 5., 1995, Pasadena, CA. **Summaries...** Pasadena: Jet Propulsion Laboratory Publications, 1995. p. 23-26.

CAMPANA, N.; TUCCI, C. E. M. Previsão da vazão em macrobacias urbanas: arroio Dilúvio em Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 4, n. 1, p. 19-33, 1999.

CANTY, M. J.; NIELSEN, A. A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. *Remote Sensing of Environment*, v.112, n.3, p. 1025-1036. 2008

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

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CLAPHAM JR., W. B. Continuum-based classification of remotely sensed imagery to describe urban sprawl on a watershed scale. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, p.

322–340, 2003.

COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs). **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora Bertrand Brasil, 2002, Cap. 3, p.103-136.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37– 46, 1960.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Gerenciamento da cheia de Manaus** – evento 2008, 2008. Disponível em < http://www.cprm.gov.br/rehi/manaus/pdf/rel_final_2008.pdf>

CONEL, J. E. Determination of surface reflectance and estimates of atmospheric optical depth and single scattering albedo from Landsat Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 5, p. 783-828, 1990.

CONGALTON, R. A review of assessment the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, p. 35– 46, 1991.

DAI, X.; KHORRAM, S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1566-1577, 1998.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 123-135, 2003a.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. The effects of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in southern Califórnia chaparral. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2-3, p. 295-309, 2003b.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. Wildfire temperature and land cover modeling using hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 212-222, 2006.

DENNISON, P. E.; HALLIGAN, K. Q.; ROBERTS, D. A. A comparison of error metrics and constraints for multiple Endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 359-367, 2004.

Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (DEP – Porto Alegre). **Plano diretor de drenagem urbana** – manual de drenagem urbana. 159p. Porto Alegre – RS: DEP, 2005.

DIAS, E. M. **A ilusão do fausto: Manaus 1890-1920**. Manaus-AM: Editora Valer, 1999. 130p.

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

FUCKNER, M. A. **Aplicação de imagens ASTER no estudo do ambiente urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. 2007. 230p. (INPE-15203-TDI/1303). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2007.

GILLESPIE, A. R.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B.; WILLIS, S. C.; FISCHER, A. F.; SABOL, D. E. Interpretation of residual images: Spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. In: **AIRBORNE VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER (AVIRIS) WORKSHOP**, 2., 1990, Pasadena, CA. **Proceedings...** Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory, 1990. p. 243-290.

GOMARASCA, M. A.; BRIVIO, P. A.; PAGNONI, F.; GALLI, A. One century of land use changes in the metropolitan area of Milan (Italy). **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 2, p. 211-223, 1993.

MELO, D. H. C. T. B. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. 2002. 146p. (INPE-9865-TDI/870). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2002.

GONÇALVES, J. C. **A especulação imobiliária na formação de loteamentos urbanos: um estudo de caso**. 2002. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente – área de concentração: Economia do Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas-SP. 2002.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, p. 65-74, 1988.

GREEN, K.; KEMPKA, D.; LACKEY, L. Using Remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, p. 331-337, 1994.

HAACK, B. N.; RAFTER, A. Urban growth analysis and modeling in the Kathamandu valley, Nepal. **Habitat International**, v. 30, n. 4, p. 1056-1065, 2006.

HALLIGAN, K. Q. **Multiple Endmember spectral mixture analysis of vegetation in the northwest corner of Yellowstone National Park**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) – University of California Santa Barbara (UCSB), Santa Bárbara-CA, 2002.

HEROLD, M.; ROBERTS, D. A.; Spectral resolution requirements for mapping urban areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 1907-1919, 2003.

HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 421-422, 1987.

HURD, J. D.; WILSON, E. H.; LAMMEY, S. G.; CIVCO, D. L. Characterization of forest fragmentation and urban sprawl using time sequential Landsat imagery. **Proceedings of the ASPRS Annual Convention**. Saint Louis, MO, April 23-27, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da população 2007**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>> Acessado em 12/01/2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Gráficos climatológicos - 2008**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/html/clima.php#>. Acessado em 12/01/2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **SPRING - Manuais: Tutorial de Geoprocessamento**. São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>> Acessado em 14/01/2009.

JAT, M. K.; GARG, P. K.; KHARE, D. Monitoring and modeling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 26-43, 2008.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2007. 592p.

JI, M.; JENSEN, J. R. Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat Thematic Mapper Imagery. **Geocarto International**, v. 14, p. 31-39, 1999.

JOHNSON, J.R.; STAID, M.I.; TITUS, T.N.; BECKER, K. Shocked plagioclase signatures in Thermal Emission Spectrometer Data of Mars. **Icarus**, v. 180, p. 60-74, 2006.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LI, L.; MUSTARD, J.F. Highland contamination in lunar mare soils: Improved mapping with multiple end-member spectral mixture analysis. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, doi: 10.1029/2002JE001917.5033, 2003.

LO, C. P.; YANG, X. Drivers of land-use/land-cover changes and dynamic modeling for the Atlanta, Georgia metropolitan area. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 10, p. 1073-1082, 2002.

LOUREIRO, A. J. S. **A grande crise (1908-1916)**. Manaus: Edição do Autor, 1986.

MARICATO, E. As idéias fora do lugar e o lugar fora das idéias: planejamento urbano no Brasil. In: ARANTES, O.; VAINER, C. B.; MARICATO, E. (Orgs.). **Cidade do Pensamento Único: desmanchando consensos**. Petrópolis-RJ: Editora Vozes, 2000.

MCKINNEY, M. L.; Urbanization, biodiversity, and conservation. **BioScience**, v.52, p. 883-890, 2002.

MELO, D. H. C. T. B. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. 2002. 146p. (INPE-9865-TDI/870). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2002.

MELLO, M. P. **Classificação spectro-temporal de imagens orbitais para o mapeamento da colheita da cana-de-açúcar com queima da palha**. 2009. 130 p. (INPE-16222-TDI/1643). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2009.

MESQUITA, O. M. **Manaus: história e arquitetura – 1890-1910**. Manaus: Universidade do Amazonas, 1997.

MOREIRA, R. C. **Estudo espectral de alvos urbanos com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System)**. 2008. 238 p. (INPE-15339-TDI/1375). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2008.

MUNDIA, C. N.; ANIYA, M. Analysis of land use/cover changes and urban expansion of Nairobi city using remote sensing and GIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 13, p. 2831-2849, 2005.

NELSON, R. F. Reducing Landsat MSS scene variability. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 5, p. 583-593, 1985.

NIELSEN, A. A. The regularized iteratively reweighted MAD method for change detection in multi-and hyperspectral data. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.16. n.2, p. 463-478. 2007.

NIELSEN, A. A.; CANTY, M. J. Multi- and hyperspectral remote sensing change detection with generalized difference images by the IR-MAD method. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE ANALYSIS OF MULTI-TEMPORAL REMOTE SENSING IMAGES, 3., 2005, Biloxi, Mississippi, USA. **Proceedings...** Biloxi: [s.n], 2005. p.169-173.

NIELSEN, A. A.; CONRADSEN, K.; SIMPSON, J. J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies. **Remote Sensing of Environment**, v.64, n.1, p. 1-19, 1998.

NUCCI, J. C. **Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicada ao distrito de Santa Cecília (MSP)**. João Carlos Nucci. 2ª ed. - Curitiba: O Autor, 2008. 150 p.; il. Disponível em: <<http://www.geografia.ufpr.br/laboratorios/labs>>. Acessado em 10/02/2009.

NUNES, S. S.; SOUZA JÚNIOR, C. M. Avaliação de modelos de mistura de pixel para áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6885-6892. CD-ROM, ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.18.11>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

OKIN, G. S.; ROBERTS, D. A.; MURRAY, B.; OKIN, W. J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. **Remote Sensing of Environment**, n. 77, p. 212–225, 2001.

OLIVEIRA, J. A. de. **Manaus de 1920-1967: cidade doce e dura em excesso**. Manaus: Edua, Valer; Governo do Estado do Amazonas, 2003.

OLIVEIRA, J. A. de (orgs.) **Amazônia: políticas públicas e diversidade cultural**. Rio de Janeiro: Garamond, 2006. 39-59.

OLIVEIRA, J. A. de. Espaço-tempo de Manaus: a natureza das águas na produção do espaço urbano. **Espaço e Cultura - UERJ**, n. 23, p. 33-41, 2008.

OLIVEIRA Jr., G. A. Redefinição da Centralidade Urbana em Cidades Médias. **Sociedade & Natureza**, v.20, n.1, p. 205-220, 2008.

PAINTER, T.H.; DOZIER, J.; ROBERTS, D.A.; DAVIS, R.E.; GREEN, R.O. Retrieval of Subpixel Snow-covered Area and Grain Size from Imaging Spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p. 64-77, 2003.

PAINTER, T.H.; ROBERTS, D.A.; GREEN, R.O.; DOZIER, J. The Effect of Grain Size on Spectral Mixture Analysis of Snow-covered Area from AVIRIS Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 320-332, 1998.

PAUL, M. J.; MEYER, J. L. Streams in the urban landscape. **Annual Review of Ecological Systems**, v. 32, p. 333-365, 2001.

PHINN, S.; STANFORD, M.; SCARTH, P.; MURRAY, A. T.; SHYY, T. Monitoring the composition and form of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by sub-pixel analysis techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 20, p. 4131-4153, 2002.

PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objeto de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos-SP**. 2005. 180p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2005.

PINTO, M. L. A. **Relação empírica da visibilidade com profundidade óptica, concentração de aerossóis e focos de queimadas em Alta Floresta e Cuiabá, em 1993 e 1994.** 2001. 141 p. (INPE-10097-TDI/893). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2001.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Atlas de desenvolvimento humano da região metropolitana de Belo Horizonte.** 2006a. Disponível em: http://www.pnud.org.br/publicacoes/atlas_bh/. Acessado em 22/05/2009.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Desenvolvimento humano em Manaus – Atlas Municipal.** 2006b. Volume I. Disponível em: < http://www.pnud.org.br/publicacoes/atlas_manau/index.php>. Acessado em 02/02/2009.

PONZONI, J. F.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** 1.ed. São José dos Campos-SP: Editora A. Silva Vieira, pp.127. 2007

POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A.; DENNISON, P. E.; HESS, L. L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 253-267, 2007.

POWELL, S. L.; COHEN, W. B.; YANG, Z.; PIERCE, J. D.; ALBERTI, M. Quantification of impervious surface in the Snohomish Water Resources Inventory Area of Western Washington from 1972-2006. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 1895-1908, 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MANAUS. **Código ambiental do Município de Manaus.** Lei 605 de 24 de Julho de 2001. Manaus: Poder Legislativo, 2001.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MANAUS. **Plano diretor urbano e ambiental do Município de Manaus.** Manaus: Poder Legislativo, 2002. Atualizado em abril/2008

Prefeitura Municipal de São Paulo. **Atlas Municipal de São Paulo.** São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://atlas municipal.prefeitura.sp.gov.br/Login/Login.aspx>>. Acessado em 15/06/2009.

RADELOFF, V. C.; HAMMER, R. B.; STEWART, S. I.; FRIED, J. S.; HOLCOMB, S. S.; MCKEEFRY, J. F. The wildland-urban interface in the United States. **Ecological Applications**, v.15, n.3, p. 799-805, 2005.

RASHED, T.; WEEKS, J.R.; ROBERTS, D.; ROGAN, J.; POWELL, R. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple endmember spectral mixture models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 1011-1020, 2003.

RASHED, T.; WEEKS, J. R.; STOW, D.; FUGATE, D. Measuring temporal compositions of urban morphology through spectral mixture analysis: Towards a soft approach to change analysis in crowded cities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 699–718, 2005.

Research Systems, Inc. **FLAASH User's guide**: ENVI FLAASH Version 4.1. Boulder: RSI, 2004. 80 p.

RICHARDS, A. R.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis**: an introduction. 4. ed. Berlin: Springer-Verlag. 2006. 439 p.

RIDD, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation – impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 2165-2185, 1995.

ROBERTS, D. A.; BATISTA, G. T.; PEREIRA, L. G.; WALTER, E. K; NELSON, B. W. Changing identification using multitemporal spectral mixture analysis: Applications in Eastern Amazonia. In: LUNETTA, R. S.; ELVIDGE, C. D. (Eds.). **Remote Sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications**. Chelsea, Michigan, United States: Ann Arbor Press, 1998a. p. 137-161.

ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 267– 279, 1998b.

ROBERTS, D. A.; KELLER, M.; SOARES, J. V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 377-388, 2003.

ROBERTS, D.; HALLIGAN, K.; DENNISON, P. **VIPER Tools user manual**. UC Santa Barbara, Department of Geography, Visualization and Image Processing for Environmental Research Laboratory, 2007. Disponível em <<http://www.vipertools.org/?q=content/envi-plugin-0>>. Acesso em 12/01/2009.

SCHOTT, J. R.; SALVAGGIO, C.; VOLCHOK, W. J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. **Remote Sensing of Environment**, v. 26, p. 1-16, 1988.

SCHROEDER, T. A.; COHEN, W. B.; SONG, C.; CANTY, M. J.; YANG, Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v.103, n.1, p. 16-26, 2006.

SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DO AMAZONAS (SEPLAN). **Atlas de desenvolvimento humano em Manaus**, 2006. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/publicacoes/atlas_manauis/>

SETTLE, J. J.; DRAKE, N. A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 6, 1159-1177, 1993.

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

SILVA, W. R. **Centro e centralidade**: uma discussão conceitual. Presidente Prudente: Formação, n.8. 2001.

SILVA JUNIOR, C.C. Especulação imobiliária e loteamentos irregulares: um estudo de caso em Caldas Novas-GO. **Revista Mirante**, v.1, n.2, p. 1-18, 2007.

SILVEIRA, A.L.L. Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. v.2, n.2, p.93-107, 1997.

SMALL, C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, 1305-1334, 2001.

SMALL, C. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, 427-442, 2002.

SMALL, C. High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 88, p. 170-186, 2003.

SMALL, C. A global analysis of urban reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, n. 26, p. 661-681, 2005.

SMALL, C. LU, J. W. T. Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, n. 4, p. 441-456, 2006.

SMITH, M. O.; JOHNSON, P. E.; ADAMS, J. B. Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal component analysis. **Journal of Geophysical Research**, n. 90, p. 792-804, 1985.

SMITH, M. O.; USTIN, S. L.; ADAMS, J. B.; GILLESPIE, A. R. Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. **Remote Sensing of Environment**, v. 31, p. 1-25, 1990.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v.75, n.2, p. 230-244, 2001.

SONG, C. Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fraction in the urban environment: How to incorporated endmember variability. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 248-263, 2005.

SOUZA, M. G.; PINHEIRO, E. S. Incidência e distribuição da tuberculose na cidade de Manaus/AM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.3, n.2, p.35-43, 2009.

TANG, J.; WANG, L.; YAO, Z. Analyses of urban landscape dynamics using multi temporal satellite images: A comparison of two petroleum-oriented cities. **Landscape and Urban Planning**, v. 87, p. 269-278, 2008.

TOMPKINS, S.; MUSTARD, J. F.; PIETERS, C. M.; FORSYTH, D. W. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 472-489, 1997.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 150p, 2003.

UNITED NATIONS. **World urbanization prospects: the 2007 revision population database**. New York: United Nations Population Division, 2007.

WENG, Q. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. **Environmental Management**, v. 28, n. 6, p. 737-748, 2001.

WU, C. S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, n. 4, p. 480-492, 2004.

WU, C.; MURRAY, A. T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 493-505, 2003.

YANG, X.; LO, C. P. Modelling urban growth and landscape changes in the Atlanta metropolitan area. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n. 5, p. 463-488, 2003.

YEH, A. G. O.; LI, X. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 1, p. 83-90, 2001.

ANEXO A – Tabela de valores do lote por bairro em Manaus

(Áreas mais valorizadas nas zonas sul e centro-sul da cidade de Manaus, destacadas em verde)

VALORES BÁSICOS DOS BAIRROS - EM R\$
PÓLOS DE VALORIZAÇÃO (VALOR MÁXIMO DO CUSTO UNITÁRIO BÁSICO)
VALIDADE DE 01 JULHO A 30 DE SETEMBRO 2009

Mapa	Bairro	Valores
1	Centro	232,46
2	N. S. Aparecida	89,97
3	Pres. Vargas	85,69
4	Praça 14	259,85
5	Cachoeirinha	259,85
6	São Raimundo	84,89
7	Glória	84,89
8	Sto. Antonio	66,23
9	Vila da Prata	78,87
10	Compensa	60,46
11	São Jorge	91,52
12	Santo Agostinho	36,82
13	Nova Esperança	70,23
14	Lírio do Vale	70,23
15	Planalto	78,37
16	Alvorada	91,89
17	Redenção	33,78
18	Bairro da Paz	37,18
19	Raiz	47,10
20	São Francisco	84,80
21	Petrópolis	70,64
22	Japiim	126,82
23	Coroado	57,20
24	Educandos	68,75
25	Santa Luzia	68,75
26	M. da Liberdade	68,75
27	Betânia	71,33
28	Col. Oliv. Machado	73,87

Mapa	Bairro	Valores
29	São Lázaro	71,49
30	Crespo	97,80
31	Vila Buriti	64,34
32	Distrito Industrial	79,00
33	Mauzinho	10,29
34	Col. Antonio Aleixo	5,57
35	Puraquequara	3,89
36	D. Pedro I	116,41
37	Flores (*3)	57,24
37	Flores (*4)	196,78
38	Parque Dez (*1)	110,14
38	Parque Dez (*2)	210,84
39	Aleixo	194,68
40	Adrianópolis	212,09
41	N.S. das Graças	227,34
42	São Geraldo	227,34
43	Chapada	196,78
44	Col. Sto. Antonio	24,73
45	Novo Israel	15,58
46	Col. Terra Nova	18,04
47	Santa Etelvina	18,04
48	Monte das Oliveiras	18,11
49	Cidade Nova	59,86
50	Ponta Negra	162,58
51	Tarumã	9,74
52	Armando Mendes	31,46
53	Zumbi	26,32
54	São José	45,80
55	Tancredo Neves	22,88
56	Jorge Teixeira	22,88

Av. Djalma Batista	373,76
Av. do Turismo	44,82

<u>Parque Dez</u>	(*1) - Valor Referente as outras áreas não incluídas em (*2) (*2) - Valor Referente as áreas no entorno da Av. Djalma Batista e Rua Recife
<u>Flores</u>	(*3) - Valor referente as outras áreas não incluídas em (*4) (*4) - Valor referente às áreas no entorno da Av. Constantino Nery, Estrada Torquato Tapajós, Av. Djalma Batista e Rua Recife.

Alteração de Valores

Os valores poderão sofrer alteração em função de pesquisa de mercado específica para avaliação de um lote urbano ou gleba urbanizável, realizada no período indicado.

ANEXO B – Anexo III da Lei no 672/2202 do Plano Diretor Urbano e Ambiental de Manaus

52

Diário Oficial do Município de Manaus

terça-feira, 05 de novembro de 2002.

LEI Nº 672/2202

**ANEXO III
QUADRO DE INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO POR UNIDADE DE ESTRUTURAÇÃO URBANA.**

(Alterado pelo Art 2º da Lei Nº 857 de 14/07/05, publicado no D.O.M. Nº 1284 de 20/07/05).

ANEXO III - QUADRO DE INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO POR UNIDADE DE ESTRUTURAÇÃO URBANA

MACROUNIDADES E UES	DIRETRIZES PARA INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO	PARÂMETROS PARA INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO						OBS.	
		CAMT Máx.	Gabarito Máx. da Edificação	Testada Mínima para Verticalização (m)	Tx de Ocup. Máx.	Afastamentos Min.			
						Frontal e de Fundos	Laterais		
ORLA RIO NEGRO OESTE	UES PONTA NEGRA	horizontal de baixa densidade	2,0	3	15,00m	60%	5,00m	2,50m	
	Setor Orla Ponta Negra	horizontal de baixa densidade	1,2	3		60%	5,00m	2,50m	
	UES CMA	horizontal de baixa densidade	0,6	3		30%	10,00m	5,00m	Área Institucional do Exército
	UES COMPENSA(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(****)	
	Setor Orla Compensa	vertical de alta densidade	5,4(**)	18		50%	0,2xH(****)	0,25xH(****)	
	UES S. RAIMUNDO(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(****)	
Setor Orla São Raimundo	vertical de alta densidade	5,4(**)	18	50%		0,2xH(****)	0,25xH(****)		
ORLA RIO NEGRO LESTE	UES EDUCANDOS	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	5,00m	
	Setor Ponta Branca Amarelinho	horizontal de baixa densidade	1,0	3		50%	5,00m	3,00m	
	Setor Industrial de Educandos	horizontal de baixa densidade	1,0	3		50%	5,00m	3,00m	
	UES VILA BURITI	horizontal de média densidade.	1,5	3		50%	5,00m	1,50m ou 2,50m(****)	
	Setor Portuário Vila Buriti	horizontal de baixa densidade	1,0	3		50%	5,00m	5,00m	
	UES MAUAZINHO(*)	horizontal de baixa densidade	1,0	3	50%	5,00m	2,50m		
	Setor BR-319 Mauazinho	horizontal de baixa densidade	0,6	3	30%	10,00m	5,00m		
	Setor Portuário Mauazinho	horizontal de baixa densidade	0,6	3	50%	10,00m	5,00m		
	UES COL. ANTÔNIO ALEIXO(*)	horizontal de baixa densidade	1,0	3	50%	10,00m	5,00m		
	Setor Portuário Col. Antônio Aleixo	horizontal de baixa densidade	0,6	3	50%	10,00m	5,00m		
CENTRO	UES PURAQUEQUARA	horizontal de baixa densidade	1,0	3	50%	5,00m	2,50m		
	Setor Portuário Puraquequara	horizontal de baixa densidade	0,6	3	30%	10,00m	5,00m		
	UES ADRIANÓPOLIS(*)	verticalização alta	4,8(**)	18	50%	0,2 x H(****)	0,25 x H(****)		
	UES VIEIRALVES(*)	verticalização média	4,8(**)	12	50%	0,2 x H(****)	0,25 x H(****)		
	UES CACHOEIRINHA(*)	verticalização média	3,0(**)	12	50%	0,2 x H(****)	0,25 x H(****)		
	UES SÃO GERALDO(*)	verticalização média baixa	3,0(**)	8	50%	0,2 x H(****)	0,25 x H(****)		
UES CENTRO	verticalização média	4,8(**)	12	90%	0,2 x H(****)	0,25 x H(****)			
UES CENTRO ANTIGO	verticalização baixa	2,0(**)	4	—	85%	sem afastamento	de fundos = 5,00m sem afast. laterais		

	Sector Sítio Histórico	horizontal de alta densidade	2,0	3	—	70%	sem afastamento	de fundos = 5,00m sem afast. laterais
INTEGRAÇÃO	UES SÃO JORGE(*)	verticalização média baixa	3,0	8	15,00m	50%	0,2xH(**)	0,25xH(**)
	UES ALVORADA(*)	verticalização média baixa	3,0	8		50%	0,2xH(**)	0,25xH(**)
	UES LÍRIO DO VALE(*)	verticalização média baixa	3,0	8		50%	0,2xH(**)	0,25xH(**)
	UES FLORES(*)	horizontal de média densidade	2,0(**)	3		60%	5,00m	2,50m
	UES PARQUE 10(*)	verticalização média baixa	3,0	8		50%	0,2 x H(**)	0,25 x H(**)
	UES ALEIXO(*)	verticalização média baixa	3,0(**)	8		50%	0,2 x H(**)	0,25 x H(**)
	UES COROADO(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES DISTRITO INDUSTRIAL I (*)	horizontal de baixa densidade	1,0	3		50%	5,00m	2,50m
	Sector Memorial da Amazônia	verticalização média	4,8(**)	12		40%	0,2 x H(**)	0,25 x H(**)
	UES JAPIIM(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
UES MORRO DA LIBERDADE(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3	70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)		
TARUMÁ-ACU	UES ITAPORANGA	verticalização média baixa	3,0(**)	8	15,00m	50%	0,2 x H(**)	0,25 x H(**)
	UES AEROPORTO(*)	horizontal de média densidade	2,0	3		60%	5,00m	3,00m
	UES PRAIA DOURADA	horizontal de baixa densidade	0,6	3		30%	5,00m	3,00m
	UES CACHOEIRA ALTA	horizontal de baixa densidade	0,6	3		30%	5,00m	3,00m
	UES TARUMÁ	horizontal de média densidade	1,5	3		50%	5,00m	2,50m
LESTE	UES SÃO JOSÉ(*)	horizontal de alta densidade	2,0	3	15,00m	70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES TANCREDO NEVES	horizontal de alta densidade	2,0	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES JORGE TEIXEIRA(*)	horizontal de média densidade	1,5	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES CIDADE NOVA(*)	horizontal de média densidade	1,5	3		70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES DISTRITO INDUSTRIAL II	horizontal de baixa densidade	0,6	3		30%	10,00m	5,00m
DÜCKE	UES NOVO ISRAEL(*)	horizontal de baixa densidade	1,0	3	15,00m	70%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES STA. ETELVINA(*)	horizontal de baixa densidade	1,0	3		60%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)
	UES BOLÍVIA	horizontal de baixa densidade	1,0	3		50%	5,00m	1,50m ou 2,50m(***)

(*) incluindo eixo(s) de atividades

(**) admitida aplicação de Outorga Onerosa do Direito de Construir e Transferência do Direito de Construir, com Coeficiente de Aproveitamento Básico do Terreno - CABT = 2,0

(***) H = altura útil da edificação, exceto caixa d'água e casa de máquinas de elevadores; afastamento mínimo = 5,00m

(****) para edificação colada em 1 divisa