

**SILVANA AMARAL KAMPEL**

**GEOINFORMAÇÃO PARA ESTUDOS  
DEMOGRÁFICOS: REPRESENTAÇÃO ESPACIAL  
DE DADOS DE POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA.**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia, junto ao  
Departamento de Engenharia de  
Transportes.

São Paulo

2003

**SILVANA AMARAL KAMPEL**

**GEOINFORMAÇÃO PARA ESTUDOS  
DEMOGRÁFICOS: REPRESENTAÇÃO ESPACIAL  
DE DADOS DE POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA.**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:

Informações Espaciais

Orientador:

Prof. Dr. Gilberto Câmara

São Paulo  
2003

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, 23 de dezembro de 2003.**

**Assinatura do autor \_\_\_\_\_**

**Assinatura do orientador \_\_\_\_\_**

#### FICHA CATALOGRÁFICA

**Kampel, Silvana Amaral**

**Geoinformação para estudos demográficos: representação espacial de dados de população na Amazônia Brasileira / S.A. Kampel. -- ed.rev. -- São Paulo, 2004.**

**166p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.**

**1.Geoinformação 2.Demografia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Transportes II.t.**

*O meu olhar é nítido como um girassol.  
Tenho o costume de andar pelas estradas  
Olhando para a direita e para a esquerda,  
E de vez em quando olhando para trás...  
E o que vejo a cada momento  
É aquilo que nunca antes eu tinha visto,  
E eu sei dar por isso muito bem...  
Sei ter o pasmo essencial  
Que tem uma criança se, ao nascer,  
Reparasse que nascera deveras...  
Sinto-me nascido a cada momento  
Para a eterna novidade do Mundo...  
Creio no mundo como num malmequer,  
Porque o vejo. Mas não penso nele  
Porque pensar é não compreender...  
O Mundo não se fez para pensarmos nele  
(Pensar é estar doente dos olhos)  
Mas para olharmos para ele e estarmos de acordo...  
Eu não tenho filosofia; tenho sentidos...  
Se falo na Natureza não é porque saiba o que ela é,  
Mas porque a amo, e amo-a por isso  
Porque quem ama nunca sabe o que ama  
Nem sabe por que ama, nem o que é amar...  
Amar é a eterna inocência,  
E a única inocência não pensar...*

*Alberto Caeiro, em "O Guardador de Rebanhos"*

*Dedico este trabalho aos amores da minha vida:*

*MILTON, ALEXANDRE E ANDRÉ.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram a seguir meu caminho acadêmico e pessoal, alcançando mais esta etapa.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI/USP, pela oportunidade de participar de seu programa de doutorado e utilização de suas instalações.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, por investir na formação e prover condições para o crescimento acadêmico e profissional de sua funcionária.

Aos professores da POLI pelo conhecimento compartilhado, em especial ao Dr. Quintanilha pela orientação inicial, pela oportunidade de participar de seu grupo de alunos, pelas revisões dos trabalhos que fizemos juntos, pelo apoio nas questões acadêmicas, pelo incentivo e principalmente pela amizade.

Ao meu orientador Dr. Gilberto Câmara, pelo paradigma que a mim representa, pela orientação, amizade e apoio para a realização deste trabalho. Agradeço principalmente por me ensinar que não existem coisas difíceis, existe apenas o que conhecemos e não conhecemos.

Ao meu chefe e mentor Dr. Antônio Miguel, que prescindiu do meu trabalho para a Divisão, permitindo que me dedicasse ao doutorado, pela atenção, entusiasmo e por jamais desistir da minha pessoa. Agradeço ainda a infraestrutura que me proporcionou, o carinho nas horas difíceis e todas as críticas e sugestões.

Aos colegas Wilfrid Schroeder (IBAMA), Wolney (IBGE), José Simeão (INPE) e Luis Maurano (PROARCO) pelos dados cedidos, sem os quais não teria sido possível a elaboração deste trabalho.

Aos amigos Sidnei Sant’Anna, Lúbia Vinhas, Karine Reis, Rosa Shimabukuro, Miro Paiva e Eduardo Camargo pelas implementações essenciais para esta tese.

Aos companheiros de campo, Diógenes, Roberto Araújo, Isabel, Ana Paula e principalmente, Marcelo Thales e Jorge Gavina pelo apoio durante a expedição à Marabá.

Aos meus amigos da Divisão de Processamento de Imagens pela solidariedade e pela ajuda, especialmente ao Diehl e Fabiano no suporte computacional, e aos colegas que compartilharam atividades de docência para que eu pudesse me dedicar à tese.

Aos meus amigos do além-mar que se fizeram presente pelas mensagens de carinho e apoio, e aos mais próximos, em especial Sérgio, Lux, família Ueta e Graça pelo suporte com meus filhos.

A minha Vó Gi, meus irmãos, cunhados e aos Kampel’s pelo apoio e incentivo, mesmo que à distância. E a meus pais, por tudo sempre e por acreditarem que eu teria futuro profissional quando optei pela graduação em Ecologia.

## RESUMO

Esta tese propõe o uso da geoinformação a serviço da demografia tomando-se a distribuição da população na Amazônia Brasileira como objeto de estudo. Foram desenvolvidos métodos baseados em dados de sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial para representar a população em superfícies de densidade. O objetivo geral foi verificar a utilidade dos dados de sensoriamento remoto para compor a base do processo de redistribuição da população, em comparação com métodos tradicionais. Especificamente, foram utilizadas imagens de luzes noturnas do sistema DMSP/OLS para a Amazônia Legal, e imagens dos sistemas CCD-CBERS1 e TM-Landsat, para a escala municipal. Inicialmente, um mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP/OLS foi avaliado quanto à capacidade de detectar presença e atividade humana na região. As relações lineares entre *pixels* de luzes DMSP e população urbana, área urbanizada e consumo de energia elétrica obtidas, motivaram o desenvolvimento de um produto de luzes noturnas mais recente e adequado para estudos de distribuição de população. A análise deste mosaico indicou o potencial e as restrições da informação de luzes noturnas para estimar a evolução dos valores de população urbana. Um novo método para interpolar e redistribuir população utilizando informações de luzes noturnas, denominado *DMSPop\_M* foi apresentado. A superfície de densidade populacional resultante mostrou-se uma opção intermediária entre as superfícies obtidas através das técnicas tradicionais para interpolar população, e a representação através dos setores censitários. Para a escala municipal, outro método multivariado para distribuir população foi desenvolvido para Marabá - PA. Dados provenientes da classificação digital de imagens CBERS e Landsat e outros dados geográficos foram selecionados como variáveis indicadoras da presença de população. Através de técnicas de pertinência e inferência *Fuzzy* a população dos setores censitários foi redistribuída em superfícies de densidade populacional. A superfície que melhor representou a distribuição populacional foi aquela obtida através de média simples das variáveis. O método desenvolvido poderá ser aplicado para modelos mais robustos em que as superfícies resultantes refletirão a relação entre variáveis proposta. Os dados de sensoriamento remoto foram fundamentais para incluir a heterogeneidade espacial nos métodos desenvolvidos. Finalmente, este trabalho contribui para que estudos de modelagem, e planejamento para a região Amazônica possam incluir adequadamente a dimensão humana no que se refere à distribuição e representação de sua densidade populacional.

## ABSTRACT

### **GEOINFORMATION AND DEMOGRAPHIC STUDIES: SPATIAL REPRESENTATION OF POPULATION DATA OVER THE BRAZILIAN AMAZÔNIA.**

This thesis presents the use of geoinformation as a valuable tool for demographic studies where the subject of interest is the population distribution over the Brazilian Amazon. Population density surfaces based on remote sensing data and spatial analysis techniques are developed as an alternative approach to represent population distribution. Remote sensing data is hypothesized as the basis for disaggregation methods to distribute population in regular cells. Specifically, imagery from DMSP/OLS night-time lights is used at global scale and from CCD-CBERS1 with TM-Landsat imagery at municipal scale. First, DMSP/OLS data is evaluated about the relations between night-time lights and human activities in Amazônia. Significant linear correlations between night-time lights and urban population, electrical power consumption and urban area are obtained. Thus, alternative techniques to generate a night-time lights mosaic are proposed and a new mosaic is generated to be used as a reference of urban population distribution. The analysis of this new DMSP mosaic reveals its potential and restrictions to estimate and to monitor the annual evolution of urban settlements. A new interpolation method to generate population density surface is developed using night-time lights data. The resultant surface, comparing to the usual interpolation methods for population is considered an intermediary option between the traditional techniques and the surface representing population data from a higher scale (the census sector). At municipal scale, a multivariate method to distribute population inside the municipal boundaries is developed for Marabá, state of Pará. CBERS and Landsat imagery and other geographical data are selected as indicator variables of human presence. These variables are converted to *Fuzzy* memberships and related to each other towards average and *Fuzzy* operators. The census sector population is redistributed in the population density surfaces. The best surface is obtained from simple average of the indicator variables. The proposed method can support different models and its population density will reproduce the consistence of them. Finally, this thesis contributes to represent the population distribution at global and municipal scale at the Brazilian Amazon. The methods and results obtained here will be helpful for any environmental modeling study in the Amazon region that cares for the local population that has been living there all along.

## SUMÁRIO

|  | Pág. |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS .....   | x    |
| LISTA DE TABELAS .....   | xiv  |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....  | xv   |
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....  | 1    |
| 1.1 OBJETIVOS .....  | 6    |
| 1.2 TENDÊNCIAS DEMOGRÁFICAS RECENTES DA REGIÃO AMAZÔNICA.....  | 8    |
| 1.3 ESTRUTURA DA TESE.....   | 13   |
| CAPÍTULO 2 BASES TEÓRICAS E CONCEITUAIS.....   | 16   |
| 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO E ESTUDOS DEMOGRÁFICOS: UM ENCONTRO<br>RECENTE .....  | 16   |
| 2.2 O SISTEMA DMSP/OLS E A UTILIDADE DAS IMAGENS DE LUZES NOTURNAS...  | 19   |
| 2.3 MODELOS PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE POPULAÇÕES ....  | 25   |
| 2.3.1 Modelos “UNIVARIADOS” para superfície de população.....  | 28   |
| 2.3.2 Modelos “MULTIVARIADOS” para superfícies de população.....   | 33   |
| CAPÍTULO 3 MOSAICO DE IMAGENS DE LUZES NOTURNAS DMSP/OLS E<br>A DETECÇÃO DE ATIVIDADES HUMANAS NA AMAZÔNIA LEGAL<br>BRASILEIRA ..... | 38   |
| 3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA ANÁLISE DO MOSAICO DE LUZES<br>NOTURNAS .....   | 39   |
| 3.1.1 Elaboração da base de dados .....  | 39   |
| 3.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO MOSAICO DE LUZES NOTURNAS DMSP.....   | 42   |
| 3.2.1 Luzes DMSP e a localização das sedes de municípios .....   | 42   |
| 3.2.2 Efeitos do mosaico DMSP.....   | 43   |
| 3.2.3 Área da mancha urbana e luzes DMSP .....   | 45   |
| 3.2.4 População residente e luzes DMSP .....   | 46   |
| 3.2.5 Consumo de energia elétrica e luzes DMSP.....  | 54   |
| 3.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....   | 56   |
| CAPÍTULO 4 PRODUÇÃO DO MOSAICO DE IMAGENS DE LUZES<br>NOTURNAS DMSP/OLS-2002 PARA ESTUDOS DEMOGRÁFICOS.....                          | 59   |
| 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS PARA GERAR O MOSAICO DE IMAGENS DMSP-2002 ...  | 60   |
| 4.1.1 Procedimentos metodológicos .....  | 61   |
| 4.2 IMAGENS RESULTANTES .....  | 65   |
| 4.2.1 Estudo da ocorrência de nuvens .....   | 68   |
| 4.2.2 Resultados da abordagem através da distribuição binomial.....  | 69   |
| 4.2.3 Estudo das transições.....   | 71   |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 4.2.4   | <i>Identificação de queimadas</i> .....   | 72  |
| 4.2.5   | <i>O produto mosaico de luzes noturnas estáveis</i> .....                         | 74  |
| 4.3   | RELAÇÕES ENTRE O MOSAICO DE IMAGENS DMSP-2002 E A POPULAÇÃO URBANA .....          | 75  |
| 4.4   | OBSERVAÇÕES DA EXPEDIÇÃO DE CAMPO .....   | 82  |
| 4.5   | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 83  |
| CAPÍTULO 5 SUPERFÍCIES DE DENSIDADE PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA..... |   | 86  |
| 5.1   | QUESTÕES AO SE REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA ..... | 86  |
| 5.2   | SUPERFÍCIES DE DENSIDADE DEMOGRÁFICA PARA A AMAZÔNIA LEGAL .....                  | 92  |
| 5.2.1   | <i>Krigeagem para superfícies de densidade de população na Amazônia</i> .         | 92  |
| 5.2.2   | <i>Picnofilático de Tobler</i> .....  | 96  |
| 5.2.3   | <i>Centróides ponderados de Martin - kernel</i> .....                             | 100 |
| 5.3   | MÉTODO MULTIVARIADO <i>DMSPop_M</i> .....   | 103 |
| 5.4   | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 110 |
| CAPÍTULO 6 SUPERFÍCIE DE DENSIDADE DE POPULAÇÃO PARA OS SETORES CENSITÁRIOS DO MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA.....                  |   | 112 |
| 6.1   | O MUNICÍPIO DE MARABÁ - PA .....  | 112 |
| 6.2   | PROPOSTA METODOLÓGICA.....  | 115 |
| 6.2.1   | <i>Método dasimétrico – restrição a áreas não habitadas</i> .....                 | 116 |
| 6.2.2   | <i>Método multivariado para uma superfície potencial de população</i> .....       | 118 |
| 6.2.3   | <i>Redistribuição da população nas células</i> .....                              | 129 |
| 6.3   | RESULTADOS - SUPERFÍCIES DE DENSIDADE DE POPULAÇÃO PARA MARABÁ..                  | 130 |
| 6.4   | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 139 |
| CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES .....   |   | 143 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   |   | 148 |
| APÊNDICE A.....   |   | 158 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Geoinformação e estudos demográficos: representação espacial de dados de população. ....   | 6  |
| Figura 2.1 - Interpolador Picnofilático de Tobler. ....   | 30 |
| Figura 2.2. Redistribuição da população através dos centróides zonais: a) zona e centróides adjacentes; b) grade regular sobreposta à região e um modelo <i>kernel</i> centralizado sobre o centróide corrente; c) os pesos do <i>kernel</i> redistribuem a contagem nas células da grade resultante..... | 32 |
| Figura 2.3 – Desagregação de dados zonais em células.....   | 34 |
| Figura 3.1 - Mosaico DMSP-1999 para a região de Belém (PA): limiar de 7% em branco e de 30% em azul. ....   | 40 |
| Figura 3.2 - Efeito da expansão de borda para luzes DMSP no limite da área urbana. ..   | 44 |
| Figura 3.3 - Efeito de contágio para luzes DMSP - conurbação.....   | 44 |
| Figura 3.4 - Efeito de margens de rio para focos de luzes DMSP. ....  | 45 |
| Figura 3.5 - Relação entre área da mancha urbana e luzes noturnas DMSP verificada para (a) todos os municípios do estado do Mato Grosso com luzes noturnas e (b) excluindo-se a região metropolitana de Cuiabá. ....  | 46 |
| Figura 3.6 - População total e número de <i>pixels</i> de luzes DMSP por município com luz na Amazônia Legal. ....  | 48 |
| Figura 3.7 - População urbana e número de <i>pixels</i> de luzes DMSP por município com luz na Amazônia Legal. ....   | 48 |
| Figura 3.8 - População urbana e número de <i>pixel</i> de luzes DMSP para os municípios com menos de 200.000 habitantes. ....   | 49 |
| Figura 3.9 - População total e número de <i>pixels</i> DMSP por município no Pará: (a) para todos os municípios; (b) excluindo-se Belém. ....   | 49 |
| Figura 3.10- População urbana e número de <i>pixels</i> DMSP por município no Pará: (a) para todos os municípios; (b) excluindo-se Belém.....   | 50 |
| Figura 3.11 - População urbana e <i>pixels</i> DMSP por município com luzes DMSP no Pará excluindo-se casos “atípicos”.....   | 51 |
| Figura 3.12 – Consumo de energia elétrica total (kWh) e população total, para os municípios do Pará, excluindo-se o consumo industrial e Belém.....   | 54 |
| Figura 3.13 – Consumo de energia elétrica em iluminação pública e comercia (kWh) e número de <i>pixels</i> de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se Belém. ....   | 55 |
| Figura 3.14 – Consumo de energia elétrica em iluminação pública e comercial (kWh) e número de <i>pixels</i> de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se casos “atípicos”.....  | 55 |
| Figura 3.15 – Consumo de energia elétrica total (kWh) e número de <i>pixels</i> de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se casos “atípicos”. ....   | 56 |
| Figura 4.1 – (a) Imagem Sem Nuvem - contagem de dias sem nuvens; (b) Imagem Luz - contagem de dias onde se detectou luz, de janeiro a junho de 2002.....  | 66 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.2 – Imagens percentagem de luz e contagem de dias sem cobertura de nuvens das regiões de Belém – PA (a e b) e Sinop - MT (c e d).....  | 67 |
| Figura 4.3 – Imagem Percentagem de Luz, com limiares de (a) 0, (b) 10, (c) 20 e (d) 30% para a região de Belém - PA. ....   | 68 |
| Figura 4.4 – Imagem Percentagem de Luz com espaço amostral de (a) 5 e (b) 10. ....  | 68 |
| Figura 4.5 - Diferenças entre as imagens com e sem processamento para redução de nuvens em (a) Belém - PA, (b) Sinop - MT e (c) São Paulo - SP.....   | 69 |
| Figura 4.6 - Imagens de média (a) e desvio padrão (b) para Belém – PA. ....   | 69 |
| Figura 4.7 - Imagens com limiares de $k = 1$ (a), $k = 3$ (b) $k = 5$ (c) e imagem percentagem de luz com limiar de 30% (d) para Belém – PA.....  | 70 |
| Figura 4.8 – Imagens resultantes das transições dos <i>pixels</i> (a) não luz/luz, e (b) luz/nuvem/outros. ....   | 71 |
| Figura 4.9 – Imagens Transição para regiões de (a) Belém - PA e (b) Sinop - MT. ....  | 72 |
| Figura 4.10 - Imagem Percentagem de Luz para a região de Sinop, com limiares e espaço amostral de (a) 10, 10 (b) 10, 30 (c) 30, 30.....   | 73 |
| Figura 4.11 – Focos de queimada acumulados para os meses de maio e junho de 2002, na região de Sinop - MT.....  | 73 |
| Figura 4.12 – Imagem Percentagem de Luz para Sinop: (a) limiar = 30, espaço = 0 e (b) após edição de queimadas. ....  | 74 |
| Figura 4.13 – Resumo dos procedimentos para o estudo das relações entre os mosaicos de imagens de luzes noturnas DMSP e dados de população urbana.....  | 76 |
| Figura 4.14 – Registro de <i>pixels</i> de luzes noturnas nas imagens mosaico DMSP referentes a 1995, 1999 e 2002. ....   | 78 |
| Figura 4.15 - População urbana e luzes noturnas para as unidades de análise DMSP: Relações para o mosaico DMSP-1995 (a) e (b), e para o mosaico DMSP-1999 (c) e (d). Unidades referentes à Cuiabá, São Luís, Belém e Manaus foram excluídos nos gráficos (b) e (d)..... | 79 |
| Figura 4.16 – Diagramas de dispersão entre (a) população urbana estimada pelo mosaico de luzes DMSP-2002 e a projeção IBGE-2001; e (b) entre população urbana estimada DMSP-2003 e a projeção IBGE-2002. ....   | 81 |
| Figura 4.17 – Mosaico de luzes noturnas DMSP-2002 com percurso de campo sobreposto – localidades populadas ao longo da PA-150, detalhe da iluminação pública em Goianésia do Pará. ....   | 83 |
| Figura 5.1 – Setores censitários 2000 do município de Governador Jorge Teixeira (RO) sobre composição colorida de imagem TM-Landsat (R5G4B3). ....  | 87 |
| Figura 5.2 – Mapa temático da população total (habitantes) por município no censo IBGE - 2000. ....   | 89 |
| Figura 5.3 – Mapa temático da densidade populacional (habitantes/km <sup>2</sup> ) por município no censo IBGE – 2000. ....   | 90 |
| Figura 5.4 – Densidade de população (habitantes/km <sup>2</sup> ) para o censo IBGE – 1991. ....  | 91 |
| Figura 5.5 – Densidade de população (habitantes/km <sup>2</sup> ) para a contagem IBGE – 1996.91  |    |
| Figura 5.6 – Densidade de população (habitantes/km <sup>2</sup> ) para o censo IBGE – 2000. ....  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.7 – Mapa temático da densidade populacional total 1991 obtido através de krigagem ordinária. ....   | 94  |
| Figura 5.8 – Mapa temático da densidade populacional total 1996 obtido através de krigagem ordinária. ....   | 94  |
| Figura 5.9 – Mapa temático da densidade populacional total 2000 obtido através de krigagem ordinária. Representação gráfica dos principais eixos de intensificação demográfica sobrepostos. ....   | 95  |
| Figura 5.10 - Mapa temático da superfície de densidade obtida através do método Picnofilático de Tobler, com dados de população total do Censo 2000 e malha municipal de 1997. ....  | 97  |
| Figura 5.11 - Mapa temático da superfície de densidade obtido através do método Picnofilático de Tobler, para a população dos setores censitários 2000. ....   | 98  |
| Figura 5.12 – Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método de ponderação pela área. ....  | 98  |
| Figura 5.13 - Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método Picnofilático de Tobler (a) e ponderação pela área (b) para Rondônia. ....   | 99  |
| Figura 5.14 - Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método Picnofilático de Tobler (a) e ponderação pela área (b) para a região de Seringueiras (RO) . ....   | 99  |
| Figura 5.15 – Superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos distritos no censo 2000. ....  | 101 |
| Figura 5.16 – Superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos setores censitários, censo 2000. ....  | 101 |
| Figura 5.17 – Mapa temático da superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos setores censitários, censo 2000 para Rondônia (a) e São Francisco do Guaporé (b). ....  | 102 |
| Figura 5.18 – Limites da classificação dos níveis digitais maiores que 30 (amarelo); limites das unidades de análise DMSP (azul) e limites dos distritos que não tiveram luzes noturnas detectadas (vermelho), sobre o mosaico DMSP-2002. Detalhes para a região de Belém (a) e Manaus (b). .... | 104 |
| Figura 5.19 – Representações de densidade de população urbana dos distritos baseado no mosaico DMSP (a) e na interpolação por <i>kernel</i> (b). ....  | 106 |
| Figura 5.20 – Mapa temático da superfície de densidade populacional obtida pelo método <i>DMSPop_M</i> e população dos distritos e municípios no censo 2000. ....  | 107 |
| Figura 5.21 – Mapa temático das diferenças de classes entre a superfície de densidade populacional dos setores censitários e a superfície <i>DMSPop_M</i> . ....   | 108 |
| Figura 5.22 – Detalhe das diferenças entre superfícies de densidade populacional dos setores censitários e a superfície com informações de luzes noturnas DMSP. ....   | 109 |
| Figura 6.1 – Localização de Marabá no estado do Pará. ....   | 113 |
| Figura 6.2 – Representação esquemática do procedimento para redistribuição da população nos setores censitários. ....  | 116 |
| Figura 6.3 – Etapas do método multivariável proposto. ....   | 119 |
| Figura 6.4 - Distância média a vias para as áreas de influência dos distritos do Pará. .   | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.5 - Distância média a rios para as áreas de influência dos distritos do Pará...   | 124 |
| Figura 6.6 - Declividade média por área de influência dos distritos do Pará.....   | 125 |
| Figura 6.7 - Função de pertinência <i>Fuzzy</i> para a distância a vias (a), distância a rios (b),<br>distância a centros urbanos (c), declividade média (d), e percentagem de floresta<br>(e). .....  | 128 |
| Figura 6.8 – Composição colorida de imagem CCD-CBERS1 – R4G3B2 (a), e<br>classificação digital resultante de aplicação de limiares (b). .....  | 130 |
| Figura 6.9 – Mapa temático da superfície de densidade de população obtidas pelos<br>operadores: Média Simples (a), Média Ponderada (b), <i>Fuzzy</i> Mínimo (c) e <i>Fuzzy</i><br>Máximo (d) para a região a oeste da sede do município de Marabá..... | 131 |
| Figura 6.10 – Mapa temático da superfície de densidade de população obtida pelo<br>operador <i>Fuzzy</i> Gama para a região a oeste da sede do município de Marabá. ....   | 133 |
| Figura 6.11 – Composição colorida de imagem ETM+/ Landsat7 – R5G4B2 e limites<br>dos setores censitários de Marabá. ....   | 134 |
| Figura 6.12 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador Média<br>Simples. ....   | 135 |
| Figura 6.13 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador Média<br>Ponderada. ....   | 136 |
| Figura 6.14 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador <i>Fuzzy</i> mínimo.<br>.....  | 136 |
| Figura 6.15 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador <i>Fuzzy</i><br>máximo.....  | 137 |
| Figura 6.16 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador <i>Fuzzy</i> Gama.<br>.....  | 137 |
| Figura 6.17 – Densidade populacional dos setores censitários 2000 e os limites dos<br>Projetos de Assentamentos de Marabá (limites na cor magenta).....  | 138 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 3.1 - Descrição dos focos de luzes noturnas DMSP não coincidentes com centros urbanos fornecidos pelo IBGE. ....                                       | 43  |
| TABELA 3.2 - Municípios da Amazônia Legal que apresentaram luzes DMSP, por classes de população total - 1996. ....  | 47  |
| TABELA 4.2 - Níveis digitais ( <i>flags</i> ) das imagens DMSP/OLS. ....  | 61  |
| TABELA 4.3 – Critério de alteração dos valores de níveis digitais comparando-se a ocorrência de luz em três imagens consecutivas. ....                        | 63  |
| TABELA 4.4 – Critérios de atribuição de pesos considerando duas transições dos valores de níveis digitais ( <i>flags</i> ) de duas imagens consecutivas. .... | 65  |
| TABELA 4.5 – Critérios de atribuição de pesos considerando três transições dos valores de níveis digitais ( <i>flags</i> ) de duas imagens consecutivas. .... | 65  |
| TABELA 4.6 – Análise da regressão linear entre luzes noturnas no mosaico de imagens DMSP ( <i>pixels</i> ) e População Urbana. ....                           | 80  |
| TABELA 5.1 – Parâmetros dos modelos de ajuste dos semivariogramas para densidade populacional de 1991, 1996 e 2000. ....                                      | 93  |
| TABELA 6.1 – Limiares para detecção de classes nas bandas CCD-CBERS1. ....  | 117 |
| TABELA 6.2– Parâmetros utilizados na definição das funções de pertinência <i>Fuzzy</i> . ....   | 126 |
| TABELA 6.3 – Operadores para relacionar as variáveis indicadoras. ....  | 129 |
| TABELA 6.4 – Exatidão Global (%) da densidade de população obtida pelos operadores em relação aos Projetos de Assentamento do INCRA . ....                    | 139 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |  |
|-------------|--|
| ANEEL       | - Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| AFWA        | - <i>Air Force Weather Agency</i>  |
| CBERS       | - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres                              |
| CCD         | - Câmera Imageadora de Alta Resolução  |
| CELPA       | - Centrais Elétricas do Pará   |
| CIESIN      | - <i>Center for International Earth Science Information Network</i>            |
| CLUE        | - <i>Conversion of Land Use and its Effects</i>                                |
| Decl        | - Declividade Média em porcentagem   |
| DMSP        | - <i>Defense Meteorological Satellite Program</i>                              |
| DMSPop_M    | - Método multivariado incluindo informações DMSP para distribuir população     |
| $DP_{grid}$ | - Densidade demográfica da célula  |
| Drios       | - Distância a rios (m)   |
| Dvias       | - Distância a vias (m)   |
| Durb        | - Distância a centros urbanos (m)  |
| ED          | - <i>Enumeration Districts</i>   |
| ETM+        | - <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>   |
| $F_{grid}$  | - Valor <i>Fuzzy</i> de possibilidade de ocorrência de população para a célula |
| GEOMA       | - Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental na Amazônia                 |
| GLASS       | - <i>Global Assessment of Environment and Security</i>                         |
| GOES        | - <i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>                    |
| GPS         | - <i>Global Positioning System</i>   |
| GPW         | - <i>Gridded Population of the World</i>                                       |
| GTOPO       | - <i>Global Topography</i>   |
| IBAMA       | - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis     |
| IBGE        | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                              |
| IDL         | - <i>Interactive Data Language</i>   |
| INCRA       | - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária                          |
| INPE        | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                    |
| IL          | - Imagem Luz   |
| IPL         | - Imagem Percentagem de Luzes  |
| IS          | - Índice de Saída  |
| ISN         | - Imagem Sem Nuvem   |
| JERS1       | - Japanese Earth Resources Satellite   |
| Landsat     | - <i>Land Satellite</i>  |

|            |  |
|------------|--|
| LBA        | - Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia                         |
| MAUP       | - <i>Modifiable Areal Unit Problem</i>   |
| MODIS      | - <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>                                   |
| NCGIA      | - <i>National Center for Geographic Information and Analysis</i>                         |
| ND         | - Nível Digital  |
| NGDC       | - <i>National Geophysical Data Center</i>  |
| STP        | - <i>Solar Terrestrial Physics Division</i>  |
| NOAA       | - <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>                                 |
| OLS        | - <i>Operational Linescan System</i>   |
| PAs        | - Projetos de Assentamentos  |
| $P_{CS}$   | - População do setor censitário  |
| PDN        | - Plano de Desenvolvimento Nacional  |
| $P_{flor}$ | - Percentagem de área coberta por floresta   |
| PIN        | - Plano de Integração Nacional   |
| $PMT$      | - <i>Photo Multiplier Tube</i>   |
| PNAD       | - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios  |
| PNUD       | - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento                                      |
| PROARCO    | - Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal |
| SAD/69     | - South America Datum – 1969   |
| SIG        | - Sistema de Informação Geográfica   |
| $SIM$      | - <i>Spatial Interpolation Methods</i>   |
| SMC        | - <i>Air Force Space and Missile Systems Center</i>                                      |
| STPD       | - <i>Solar Terrestrial Physics Division</i>  |
| SUDAM      | - Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia  |
| Surpop     | - <i>Surface Population</i>  |
| TIR        | - <i>Thermal Infrared</i>  |
| TM         | - <i>Thematic Mapper</i>   |
| UaDMSP     | - Unidade de análise DMSP  |
| UTM        | - <i>Universal Transverse Mercator</i>   |
| VNIR       | - <i>Visible Near Infrared</i>   |
| WGS-84     | - <i>World Geodetic 1984</i>   |
| WRS        | - <i>World Reference System</i>  |

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A Amazônia Legal Brasileira registrou 21,1 milhões de habitantes no censo de 2000 e densidade demográfica de 4,0 habitantes por km<sup>2</sup>. Esta população corresponde a 12,4% do total da população brasileira, em contraste com a contribuição de 5,8% em 1950 (SUDAM/PNUD, 2001). As taxas de fecundidade atuais ligeiramente acima da média nacional e os fluxos migratórios explicam este incremento. A evolução do crescimento populacional da região Amazônica deu-se de modo similar à população brasileira, tanto nas áreas urbanas quanto rurais<sup>1</sup>, incluindo um intenso processo de urbanização recente. Em 1970, a população urbana correspondia a 35,5% da população total da região, aumentando para 44,6% em 1980, 58% em 1991, 61% em 1996 e 69% em 2000 (IBGE, 2001). A diversificação das atividades econômicas e as mudanças populacionais decorrentes reestruturaram e reorganizaram a rede de assentamentos humanos, levando a criação e o uso do termo "floresta urbanizada" (Becker, 1998) para designar a região Amazônica.

Contudo, o crescimento da população urbana não foi acompanhado pela implementação da infra-estrutura necessária para garantir condições mínimas de qualidade de vida. Baixos índices de saúde, educação e salários aliados à falta de equipamentos urbanos, denotam a baixa qualidade de vida da população local (Becker, 1995; Browder e Godfrey, 1997; Monte-Mór, 1998). Na Amazônia, a condição de vida nas cidades e nos assentamentos humanos constitui um dos maiores e piores problemas ambientais (Becker, 2001).

Por outro lado, a Amazônia Brasileira, com seus 5 milhões de km<sup>2</sup>, ainda contém a maior área de florestas tropicais contínuas e preservadas do mundo: aproximadamente 4 milhões km<sup>2</sup> de florestas. Dados recentes estimam em 25.400 km<sup>2</sup> a taxa de desflorestamento para o período 2001-2002 (INPE, 2003). Por sua extensão e importância na dinâmica de processos climáticos e biogeoquímicos, a região Amazônica Brasileira tem sido objeto de estudo freqüente da comunidade científica preocupada

---

<sup>1</sup> População urbana – toda pessoa cujo domicílio encontra-se no perímetro urbano, definido por lei, é contabilizada como população urbana (IBGE, 1995).

com alterações no ciclo do carbono, nas conseqüências sobre as mudanças ambientais e climáticas globais (Potter *et al.*, 2001; Laurence *et al.*, 2001; LBA, 2003; Roberts, 2003; Duriex *et al.*, 2003; Ballester *et al.*, 2003) e nos impactos sobre a biodiversidade, dando suporte a atividades ambientalistas de preservação (Fearnside, 2001).

Dentre os fatores que determinam o desmatamento, a densidade populacional, principalmente rural, é freqüentemente apontada como determinante para o desflorestamento local, como descrito por Laurence *et al.* (2002). Em uma análise mais ampla sobre as forças condicionantes do desmatamento tropical, Geist e Lambin (2001) identificam dois tipos de causas: (i) as locais, mais próximas em tempo e espaço; (ii) as forças implícitas ao processo. Segundo estes autores, a variação da população explicou em termos estatísticos, metade dos casos de desmatamento estudados e apenas em menos de 25% dos casos, a dinâmica populacional não esteve em combinação com as forças implícitas. Contudo, o crescimento populacional não constitui uma única força atuante, é uma variável em um sistema de múltiplas respostas, que opera concomitantemente ou é condicionada por outras forças implícitas, tais como, fatores econômicos, políticos, institucionais e culturais.

O efeito da densidade populacional sobre as atividades de desmatamento pode ainda apresentar diversos padrões, dependendo da escala de análise (Wood e Skole, 1998). O efeito da pressão demográfica sobre as atividades de desmatamento decresce com a própria densidade, sendo mais efetivo no início do processo e decaindo conforme novos contingentes dão entrada na área rural. Pfaff (1999) apresentou um modelo para explorar os determinantes do desmatamento na Amazônia Brasileira e observou que a densidade de população não apresentou efeito significativo sobre o desmatamento quando outros determinantes potenciais foram incluídos. Porém, a distribuição da população ao longo do tempo foi importante para determinar o impacto de novos migrantes sobre o desmatamento.

Segundo Sydenstricker-Neto (2002), a questão implícita no debate atual entre o grupo de pesquisa de Laurence (Laurence *et al.*, 2001; Laurence e Fearnside, 2002) e de Nepstad (Nepstad *et al.*, 2002a; Nepstad *et al.*, 2002b) sobre o desenvolvimento da Amazônia resume-se na diferença do modelo teórico adotado para o fator população. Fearnside e Laurence adotaram uma abordagem neo-Malthusiana, para a qual não há

alternativas para o desmatamento senão assumir a intrínseca habilidade humana de degradar o ambiente, especialmente em situações onde há pressão populacional. O grupo de Nepstad por sua vez, adotou uma abordagem Boseruptiana, para a qual a capacidade criativa da natureza humana permitirá uma adaptação a novas realidades e a descoberta de soluções para a degradação ambiental. A restrição do acesso às florestas não preservará por si só o recurso natural. A sociedade deveria promover iniciativas de planejamento para conter o desmatamento e através de novas instituições poder-se-ia atribuir poder a neutralizadores locais. As relações entre desmatamento e população são muito complexas sendo que, múltiplos fatores operam simultaneamente interagindo uns sobre os outros e não apresentam um caráter universal, pelo contrário, são histórica e geograficamente dependentes do local. Por estas razões, há uma necessidade proeminente de abordagens analíticas para integrar as realidades biofísicas e sociais, incluindo as relações de reciprocidade entre estas realidades.

Dados de sensoriamento remoto têm desempenhado um papel fundamental nos estudos que procuram integrar as dimensões humanas e biofísicas para a compreensão dos processos de alteração do uso e cobertura do solo na região Amazônica (Frohn *et al.*, 1996; Wood e Skole, 1998). Em se tratando das ligações entre as análises sócio-demográficas e o sensoriamento remoto, as alterações do uso e cobertura do solo têm se apresentado como o tema unificador desta integração, combinando dados e análises de sensoriamento remoto com perspectivas e métodos das ciências sociais (McCracken *et al.*, 2002). Cientistas ambientais que trabalham com sensoriamento remoto em estudos sobre o uso do solo preocupam-se com as mudanças na paisagem, cuja unidade de observação é o *pixel*. A resolução, a escala e a quantidade de informação disponível (traduzida nas bandas espectrais dos sensores remotos) dependem da plataforma orbital selecionada. Por outro lado, cientistas sociais que trabalham com dados censitários de amostragens preocupam-se com diferentes questões metodológicas e conceituais na análise dos atores sociais. Neste caso, a distinção entre as unidades de observação, unidades de análise e os níveis de análise, é fundamental. Eventos, indivíduos, famílias, grupos sociais, comunidades e outras formas de organização são unidades de análise, enquanto que os dados utilizados nestas análises são geralmente provenientes de censos e amostragens de indivíduos ou núcleos familiares. A confusão decorrente das diferenças entre estas escalas poderá causar interpretações errôneas. As perguntas que

devem ser feitas são: (i) quem são os atores sociais de interesse ? (ii) qual é a dimensão espacial destes atores?

Neste escopo de pesquisa encontra-se a aplicação de conceitos e métodos demográficos utilizados para explicar os diferentes padrões de uso e cobertura do solo na região Amazônica, concentrados principalmente na escala familiar, de mudanças locais (Moran *et al.*, 1994; Moran e Brondízio, 1998; McCracken *et al.*, 1999; Moran *et al.*, 2003). Coorte, idade e efeitos de período, por exemplo, são usados para compreender os processos de transformação da paisagem, principalmente os padrões e níveis de desmatamento e sucessão secundária. Este tipo de abordagem é indispensável para a compreensão dos processos de desmatamento e alterações da paisagem local. Porém, pelas unidades de observação e de análise adotados nestes trabalhos, os resultados não podem refletir os processos genéricos ou padrões globais para a região Amazônia. Apesar da aplicação de conceitos demográficos, o enfoque ou preocupação central reside na alteração do ambiente físico, no desmatamento, e não na questão do ambiente humano.

Durante muito tempo, a visão predominante em estudos sobre população e ambiente considerava apenas a pressão de números (população) sobre os recursos naturais. As discussões refletiam as relações entre o homem e a natureza, não abordavam a dinâmica populacional como determinante ou conseqüência de fatores ambientais (Hogan, 1989). Atualmente, a versão predominante da relação população - meio ambiente - desenvolvimento é aquela considerada mais moderada, onde a pressão demográfica não é mais a determinante de problemas ambientais, mas apenas um fator agravante (Hogan, 2000).

Assim, a presença humana na região Amazônia, ao mesmo tempo em que condiciona alterações ambientais, é influenciada pelo ambiente resultante. A atribuição de causa e efeito dependerá da visão, escala de análise e área de conhecimento em questão. A maioria dos trabalhos científicos na região que abordam a questão humana e o meio ambiente integrados por técnicas de sensoriamento remoto, ou trabalham na escala micro, ou têm na população a grande variável independente.

Este trabalho também e principalmente se motivou pela demanda da inclusão da dimensão humana em estudos e planejamento de sustentabilidade, vulnerabilidade e modelagem ambiental na região Amazônica. Do esforço conjunto dos centros de pesquisa do Ministério da Ciência e Tecnologia formou-se uma rede temática de cooperação científica com o objetivo de executar projetos interdisciplinares na área de modelagem ambiental na Amazônia, denominada GEOMA. No âmbito desta rede, modelos matemáticos serão criados para estudar a Amazônia. Um dos aspectos que serão tratados pelo GEOMA engloba mudanças de cobertura da terra e seus impactos sobre o clima, biodiversidade e a caracterização da dinâmica dos assentamentos humanos na região Amazônica (Geoma, 2003).

Neste trabalho, o conceito de população é limitado à estimativa de pessoas residentes, uma vez que os dados utilizados para caracterizar a população, são os valores de censos e contagens demográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A propriedade explorada desta população é sua alocação e distribuição no espaço, para a qual, as ferramentas de geoinformação, enquanto sensoriamento remoto e análise espacial, se aplicam.

Considerando-se finalmente a importância da variável população para estudos de modelagem e planejamento da região Amazônica, o desafio que se coloca é aplicar a geoinformação, traduzida em dados de sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial, para representar e caracterizar na escala macro a distribuição da população na Amazônia Legal Brasileira. A preocupação final é contribuir para que os modelos ambientais que forem desenvolvidos para a Amazônia incluam corretamente a distribuição populacional e sua dinâmica. A densidade da população pode ser representada através de uma estrutura mais refinada que somente os polígonos para os quais se obteve o dado de contagem e amostragem, ou seja, em superfícies regulares que descrevem a densidade por unidade de área. Dados geográficos, como os provenientes de sensoriamento remoto, descrevem a heterogeneidade espacial e possibilitam a redistribuição mais apropriada da densidade de população.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho potencializa o uso de conceitos e técnicas de análise espacial associadas a dados de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica, para estudar e representar a distribuição da população na região Amazônica. Propõe o uso da geoinformação a serviço da demografia, tomando-se a distribuição da população como objeto de estudo.

Através de técnicas de análise espacial e dados de sensoriamento remoto este objeto de estudo, a distribuição populacional, adquire possíveis representações espaciais que o descrevem. As representações por sua vez permitem identificar novas feições e aspectos que podem ser traduzidos em conceitos no universo da demografia, corroborando ou questionando teorias. As teorias por sua vez poderão interagir com as técnicas e os dados do universo da geoinformação para fertilizar o processo de representar e analisar questões demográficas (Figura 1.1).

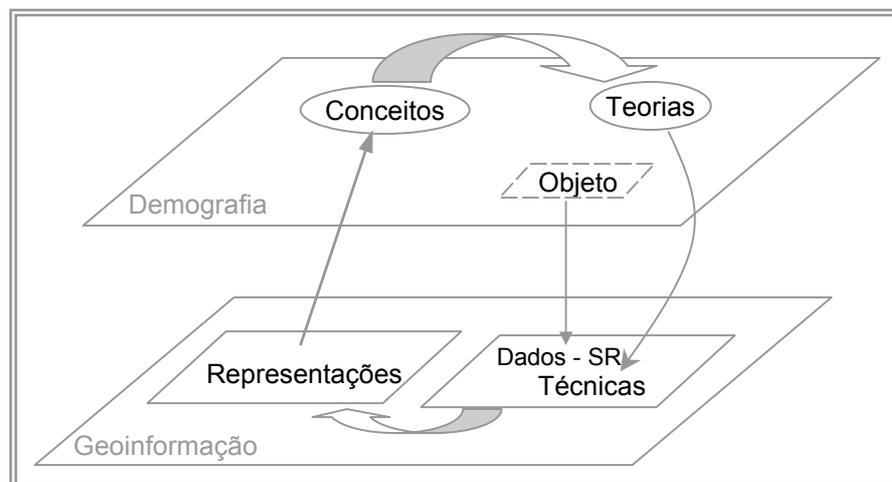


Figura 1.1 – Geoinformação e estudos demográficos: representação espacial de dados de população.

Esta tese parte da hipótese que existe um modelo conceitual subjacente na representação da população que deve ser explicitado *a priori* e este modelo pode ser construído através de dados geográficos auxiliares, especificamente aqueles provenientes de sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial. O modelo conceitual supõe uma distribuição potencial da população, que permitirá a desagregação por unidade de área, correspondente à localização física da população.

Assim, o objetivo inicial foi verificar se dados de sensoriamento remoto, especificamente imagens de luzes noturnas do sistema *Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System* (DMSP/OLS) poderiam constituir a base deste processo de modelagem, em comparação com métodos tradicionais de se representar a distribuição da população na escala da Amazônia Legal. Adicionalmente, considerando-se que para cada escala de análise há uma forma mais adequada para representar a população, procurou-se verificar se imagens de sensoriamento remoto de resolução espacial mais fina (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - CBERS e Landsat), juntamente com outras variáveis, poderiam definir uma superfície adjacente de modo a desagregar e representar a população para a escala do município.

Para cumprir estes objetivos gerais, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Avaliar a contribuição de um mosaico de imagens de luzes noturnas do sistema DMSP/OLS para a detecção de atividades humanas na Amazônia Legal Brasileira, especificamente quanto a:
  - Localização de assentamentos urbanos;
  - Relação com áreas urbanizadas;
  - Relação com estimativas e distribuições de população;
  - Relação com o consumo de energia elétrica;
- Definir e implementar uma metodologia científica de modo a gerar um produto orbital composto de luzes noturnas estáveis, referente a um mosaico semestral de imagens durante o ano de 2002 para auxiliar os estudos de distribuição populacional;
- Verificar a utilidade do mosaico de luzes noturnas para estimar a população urbana na Amazônia Legal Brasileira;
- Verificar a contribuição, através de análise comparativa, dos principais interpoladores espaciais para representar a população através de superfícies de densidade;

- Utilizar o mosaico de imagens de luzes noturnas como referência da distribuição da população urbana, compondo uma superfície de densidade de população e compará-la aos interpoladores tradicionais;
- Propor, através de técnicas de interpolação espacial da população e imagens CBERS e Landsat, um método para desagregar e representar a variabilidade da população dentro dos setores censitários para um município da Amazônia Legal, Marabá, no sudoeste do estado do Pará.

## **1.2 Tendências demográficas recentes da região Amazônica**

A caracterização da área de estudo não tratará das características físicas da região Amazônica. Considerando que este trabalho tem como objeto de estudo a distribuição da população, a caracterização da área se fará através das tendências demográficas recentes da Amazônia Legal Brasileira. Esta descrição geral do cenário Amazônico permeará os capítulos que se seguirão, auxiliando nas propostas metodológicas e análise dos resultados.

A área de estudo deste trabalho corresponde à Amazônia Legal<sup>2</sup> (estados da região norte, Mato Grosso e oeste do Maranhão), que totaliza uma superfície de 5.217.423 km<sup>2</sup>, aproximadamente 61% do território brasileiro.

A Amazônia Legal Brasileira, com 21,1 milhões de habitantes em 2000, apresentou um crescimento demográfico superior ao esperado para o período 1996-2000. Conforme o diagnóstico e cenarização macrossocial realizado pela Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia/Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (SUDAM/PNUD, 2001) e os dados censitários fornecidos pelo IBGE, o crescimento foi acelerado entre 1960-1980, passou por um período de desaceleração entre 1991-1996 e retomou a aceleração entre 1996-2000. Em todos os casos, as taxas de crescimento da população urbana foram sempre mais elevadas que as da população rural.

---

<sup>2</sup> A Amazônia Legal é composta pelos estados da região norte (Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia e Roraima), além dos estados do Tocantins, Mato Grosso e oeste do Maranhão, totalizando 756 municípios para a malha municipal de 1997. Os 5 municípios de Goiás, que segundo o IBGE pertencem à Amazônia Legal, não foram incluídos neste trabalho.

A região passou por uma intensa urbanização. Enquanto em 1940 a população era 23,1% urbana, em 2000 correspondia a 68,1% do total. Este fenômeno foi ainda mais significativo em cidades de 100.000 a 500.000 habitantes, ressaltando-se quatro municípios que passaram para esta categoria: Ananindeua (PA), Araguaína (TO), Caxias (MA) e Palmas (TO). As cidades de Belém e Manaus constituem as metrópoles regionais, polarizando a Amazônia ocidental e oriental respectivamente. Entretanto, cada metrópole regional apresentou uma evolução distinta. Enquanto Manaus concentrou sua população, correspondendo a 32,4% em 1970 e a 49,4% do total do estado do Amazonas em 2000, Belém diminuiu sua participação de 28,8% para 20,7% do total do estado do Pará, no mesmo período. Enquanto o município de Belém tendeu a estabilizar seu crescimento populacional, os outros 4 municípios de sua região metropolitana (Ananindeua, Marituba, Benevides e Santa Bárbara do Pará) cresceram intensamente na última década, chegando a valores de crescimento populacional médio de 12% ao ano em Ananindeua.

Excetuando-se Belém e Manaus, dentre as cidades amazônicas, apenas Várzea Grande (MT), Imperatriz (MA), Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Ananindeua (PA), Cuiabá (MT) e São Luís (MA) apresentaram-se com mais de 200.000 habitantes no censo de 2000. Basicamente, o crescimento urbano faz-se por: aumento vegetativo, migrações e incorporação de áreas anteriormente classificadas como rurais. Entre 1996 e 2000, 142 localidades passaram a condição urbana, representando 20,4% do incremento da população urbana total da Amazônia Legal Brasileira.

Os estados mais populosos foram o Pará, Maranhão, Amazonas e Mato Grosso que contribuíram respectivamente com 29,4%, 26,9%, 13,5% e 11,5% do total da população da Amazônia Legal, ou o equivalente a 12 milhões de pessoas. Os estados do Acre, Amapá, Amazonas e Roraima apresentaram taxas de crescimento maiores que a média regional para o período de 1996-2000. Todos os estados apresentaram crescimento populacional exclusivamente urbano, sendo que no Mato Grosso, Tocantins e no Maranhão foram observadas taxas de crescimento populacional rural negativas. Os estados do Acre, Tocantins, Maranhão e Mato Grosso tiveram os maiores incrementos de população urbana. O Amapá foi o estado mais urbanizado (89% do total da

população), seguido pelo Mato Grosso e Roraima (61,8% da população na capital Boa Vista).

O processo de urbanização acelerado da Amazônia evidenciou movimentos migratórios do tipo rural-urbano, uma vez que o crescimento vegetativo urbano é menor que o rural. Segundo Hogan (2001), a rápida urbanização reflete tanto a diminuição progressiva do potencial agrícola para absorver migrantes, como sinaliza a existência de um contingente de trabalhadores sub-empregados ou desempregados, que migraram para a região e não foram fixados no campo. Nas décadas de 70 e 80 os programas de desenvolvimento e instalação de infra-estrutura fomentaram o crescimento da população rural, com saldo líquido regional migratório rural-urbano negativo. Os estados de Rondônia, Pará e Mato Grosso tiveram taxas positivas de crescimento populacional rural expressivas. Nos anos 80, as áreas rurais tiveram um aporte de 1,1 milhão de pessoas oriundas de outras regiões. Na década de 90, o êxodo rural diminuiu em 36% (640 mil pessoas) o total da população no campo. A evasão rural foi predominantemente feminina, na faixa etária entre 15 e 19 anos, levando a uma feminilização da população urbana e masculinização da população rural. O estado do Pará foi responsável por 53% do fluxo de migrantes do êxodo rural (700 mil pessoas), seguido pelo Maranhão que foi responsável por um terço do fluxo regional. As áreas rurais do estado do Amazonas tiveram incrementos de aproximadamente 60 mil pessoas. Os processos migratórios para o período de 1986 a 1996, nos estados do Mato Grosso, Rondônia e Tocantins encontram-se detalhados em Cunha (2002).

A família Amazônica tem tamanho médio de 3,87 pessoas, enquanto que no Brasil o valor é de 3,50. Na região Amazônica 22% das famílias não tem filhos e mais de 40% tem apenas filhos menores de 12 anos, o que caracteriza a predominância de núcleos familiares em expansão. Os chefes de família foram identificados como mais jovens, menos escolarizados, e de renda mais baixa que a média nacional.

A distribuição etária da população na região apresentou um estreitamento da base devido à queda da fecundidade, e ao mesmo tempo, alargamento do topo causado pelo aumento da longevidade, caracterizando um envelhecimento populacional. As estimativas e projeções populacionais indicam que serão 23 milhões de habitantes em 2005 e 27,3 milhões em 2020 na região. Estas projeções consideraram a redução

continuada da taxa de crescimento populacional: de 1,9% a.a. entre 2000-05 e 1,3% a.a de 2015-2020.

Segundo Moura e Moreira (2001), a dinâmica migratória recente indica uma redução dos fluxos migratórios inter-regionais. A dinâmica migratória na década de 80 refletiu a expansão demográfica e econômica das fronteiras agrícolas abertas no início do período, que resultaram em aumento da população rural. Na segunda metade dos anos 80 e nos anos 90 as migrações foram exclusivamente urbanas, sendo compostas em boa parte por migrantes que se deslocaram anteriormente para a zona rural. Foram considerados fatores determinantes dessas migrações: a falta de atrativos para a zona rural, a diminuição da desruralização dos estados da região sul, a falta de emprego no sul, a diminuição das taxas de fecundidade nas populações rurais da região sul e a escassez de terras baratas e férteis nas áreas de destino, como ocorreu anteriormente em Rondônia. Mesmo a região nordeste, que tradicionalmente contribuiu para a imigração, a queda das taxas de fecundidade e a falta de grande período de seca reduziram e estabilizaram os fluxos deste contingente para a região norte.

Na década de 90 houve uma diminuição generalizada do movimento migratório na Amazônia Legal, com saldo regional reduzido à metade, tornando-se uma região de perda populacional em favor das demais regiões, exceto para a região nordeste. No Pará, que tradicionalmente apresenta grandes volumes de fluxo migratório, houve queda de 20% na imigração interestadual. O estado de Rondônia foi o que teve maior decréscimo relativo, ou seja, 52% do volume de imigrantes entre 1986 e 1991. O estado do Amazonas diminuiu em 20% o ingresso de migrantes e Roraima manteve o mesmo índice de migrantes intra-regional, além de uma queda de 25% do influxo migratório de outras regiões. O estado do Tocantins teve aumento de 15% de imigrantes e o Amapá de 80%, oriundos principalmente da própria região Amazônica, das ilhas paraenses de fraca infra-estrutura. Apenas os estados do Amapá, Pará e Roraima apresentaram contracorrente (e)migratória superiores às do período anterior. Os estados de Rondônia e Pará tiveram saldo migratório negativo. A desintensificação dos fluxos migratórios pode estar relacionada à maior capacidade de retenção dos fluxos, paralelamente a uma redução no estoque de emigrantes em potencial. Considerando-se as micro-regiões de capitais nos estados do Amapá, Roraima, Tocantins, Rondônia e Amazônia, destacaram-

se migrantes majoritariamente interestaduais. No Pará e Acre destacaram-se os migrantes de curta distância, oriundos de municípios do próprio estado.

Ainda segundo Moura e Moreira (2001), os movimentos trans-fronteiriços de indocumentados constituem uma nova vertente migratória na região norte. A Polícia Federal registrou no período de 1995 a 2000, a entrada de 106,8 mil pessoas no estado do Amazonas, contra 91,2 mil saídas. Os autores colocam que esta migração precisa ser estudada e documentada para se evitar conflitos na região de fronteira.

O que se observa para a região Amazônica é a questão da territorialidade ainda em formação. Há mobilização local reivindicando a criação de novos estados: o estado do Tapajós e do Araguaia, emancipados do Pará, e os estados do Rio Negro, Juruá e Solimões a partir do estado do Amazonas, por exemplo. O desmembramento do estado do Amazonas em novos territórios deve levar a um esvaziamento dos interiores, considerando que são regiões de baixa densidade demográfica, fraco grau de urbanização, taxas de crescimento inferiores à média regional, população predominante feminina, jovem e submetida a processos migratórios intensos. Moura e Moreira (2001) ainda resumem:

- Não há indícios de expansão espacial da presença humana com base nos estoques regionais;
- O intenso processo de urbanização da população amazônica concentrou a população nas capitais e em núcleos de médio porte. A população tende a se estabilizar em núcleos com infra-estrutura razoável, de serviços sociais básicos e possíveis alternativas de renda;
- A queda das taxas de fecundidade no país fará com que o crescimento da população brasileira seja insuficiente para gerar fluxos migratórios de excedentes populacionais. A região Amazônica apresentou-se como perdedora líquida de população para o restante do País (excetuando-se a região nordeste). Os movimentos migratórios residentes na região são consequência dos grandes influxos anteriores: movimentos com origem e destino determinados, de pequeno volume, além do movimento dos sem terra e pequenos proprietários que ocuparam a região recentemente;

- Novos pólos de dinamismo regional, associados aos novos eixos de comunicação das rodovias e portos desenham um processo de ocupação demográfica seletiva, pontual em torno destes eixos de expansão.

Complementarmente às tendências demográficas globais da região Amazônica descritas anteriormente, há particularidades regionais, em função dos processos de ocupação atuantes. Destaca-se como exemplo a evolução da fronteira na ponta do Arco do Desmatamento, no Estado do Pará, incluindo duas regiões: (i) a primeira, nas localidades de Novo Progresso e Castelo de Sonhos na Rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém), pertencentes aos municípios de Novo Progresso e Altamira, respectivamente; (ii) a segunda, no município de São Félix do Xingu, incluindo este município e mais as áreas de fronteira em direção ao rio Iriri compreendidas entre o rio Xingu a leste, estado do Mato Grosso ao sul, BR-163 a oeste e a Rodovia Transamazônica ao norte, conhecida como Terra do Meio (Castro *et al.*, 2002). Ao relatar os processos de avanço da fronteira os autores constataram um movimento de “migração do trabalho”, como ocorrido anteriormente em Açailândia (MA) e Marabá (PA). O fluxo é basicamente de pessoas que vêm em busca de emprego, originários de áreas onde a atividade madeireira entrou em decadência, principalmente do Mato Grosso. Aproximadamente 40 pessoas ou grupos familiares chegam por mês em Castelo dos Sonhos, seguindo o deslocamento das madeiras. Aliados aos trabalhadores vêm grupos de famílias de pequenos produtores, assentados anteriormente pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) no Mato Grosso, onde a pequena produção já se tornou pouco rentável e ainda, fazendeiros capitalizados interessados na pecuária. Assim, o mercado de terras desloca para a região de fronteira tanto empresários, que investem na produção extrativa e de grãos, quanto pessoas que migraram para a região há mais de vinte anos e tiveram atividades anteriores, como colonos sitiantes, assentados do INCRA, posseiros e mesmo garimpeiros. Esta busca de terra nas áreas de fronteira é um dos fatores que ilustram a mobilidade interna atual na região Amazônica.

### **1.3 Estrutura da tese**

No Capítulo 2 encontram-se as bases teóricas para a elaboração deste trabalho. Inicia-se apresentando a aplicação de sensoriamento remoto em estudos demográficos de

diferentes naturezas. Na seqüência, apresenta-se uma revisão sobre o uso de imagens de luzes noturnas para detecção de atividades humanas e a caracterização do sistema sensor que justificaram a escolha deste dado para a Amazônia Brasileira. Finalmente as principais técnicas de modelagem e interpolação espacial para inferir superfícies de densidade de população são apresentadas.

No Capítulo 3, o primeiro mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP/OLS ao qual tivemos acesso, referente a setembro de 1999, foi avaliada quanto ao tipo e qualidade de informação que poderia ser obtida para a Amazônia Legal. Esta avaliação deu-se através da integração das informações censitárias, de dados de consumo de energia elétrica, e de limites de regiões urbanizadas, com as informações provenientes dos focos de luzes noturnas. Os resultados deste capítulo, evidenciando as relações entre as luzes noturnas e atividades humanas, demandaram a construção de um produto de luzes noturnas mais apropriado para tais estudos na região Amazônica.

Assim sendo, o Capítulo 4 apresenta o procedimento metodológico desenvolvido e implementado para geração de um mosaico para o período de janeiro a junho de 2002. Na seqüência, o mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP-2002 foi analisada quanto às suas relações com as estimativas e projeções de população urbana para a região.

O Capítulo 5 inicia-se apresentando questões pertinentes à representação da distribuição espacial da população na Amazônia Brasileira. Na seqüência, superfícies de densidade populacional foram construídas e apresentadas para os dados censitários recentes, com uso de técnicas de modelagem e interpolação mais utilizadas. A integração com os capítulos anteriores se dá através do uso de dados de luzes noturnas DMSP-2002 para elaborar uma representação de densidade populacional através do método multivariado desenvolvido neste trabalho, denominado *DMSPop\_M*. Finalmente, apresenta-se uma análise desta superfície inovadora através da comparação com dados de densidade populacional obtidos para uma escala maior (setores censitários).

No Capítulo 6 há uma mudança de escala. O desafio que se apresentou foi desenvolver um método que permitisse desagregar a população no interior de um município, a partir dos limites de seus setores censitários. Assim, uma imagem do sensor Câmera

Imageadora de Alta Resolução (CCD) do primeiro Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS1) permitiu a definição dos procedimentos para uma região do município de Marabá. Imagens Landsat foram utilizadas para expandir a metodologia para todo o município. A partir de técnicas de inferência *Fuzzy* e um modelo muito simples para correlacionar informações geográficas com a presença de população, foram criadas superfícies de densidade populacional. Estas superfícies foram finalmente avaliadas quanto à capacidade de representar a população tendo-se como referência informações de campo e dados de Projetos de Assentamentos (PAs) do INCRA.

O Capítulo 7 apresenta os comentários finais quanto aos resultados obtidos, destacando as contribuições e propondo a continuidade da pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### BASES TEÓRICAS E CONCEITUAIS

Este capítulo apresenta as informações teóricas e conceituais que embasaram o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, apresentam-se exemplos do potencial dos dados de sensoriamento remoto para estudos e caracterizações demográficas de população. Na seqüência, apresenta-se a descrição de um tipo específico de dados de sensoriamento remoto, imagens proveniente do sistema sensor *Defense Meteorological Satellite Program / Operational Linescan System* (DMSP/OLS), e a aplicabilidade destas em estudos de identificação de atividades humanas, população e urbanização. Finalmente, apresentam-se as principais técnicas de interpolação usualmente utilizadas em sistemas de informação geográfica e banco de dados globais para representar computacionalmente dados referentes à distribuição de população.

#### 2.1 Sensoriamento Remoto e Estudos Demográficos: um encontro recente

Na maioria dos estudos em que dados de sensoriamento remoto são associados a questões demográficas, as variáveis de demografia tais como tamanho, densidade e distribuição da população, são comumente modeladas como variáveis independentes, ou seja, responsáveis por alteração nos padrões discerníveis nas imagens de satélites. Porém, as mudanças de uso e cobertura do solo também promovem impactos sobre a dinâmica populacional. Ou seja, padrões da paisagem ou informações existentes em dados de sensoriamento remoto podem fornecer informações quanto à dinâmica populacional como, por exemplo, migração, fertilidade e formação de núcleos familiares (Sherbinin *et al.*, 2002).

Estimativas de população podem ser obtidas a partir de contagens individuais por habitação, de medidas da extensão urbana ou mesmo através da classificação de uso e cobertura do solo. Segundo Jensen e Cowen (1999), dados de sensoriamento remoto podem fornecer estimativas semelhantes às estimativas censitárias, desde que as informações das imagens orbitais sejam corretamente calibradas. Estes dados constituem informação útil para regiões deficitárias de censo e principalmente, para obter informações intercensos. Para tanto, os autores sugerem a contagem das

residências através dos dados de sensoriamento remoto e assim, depara-se com o primeiro fator limitante para aplicação desta técnicas: são necessárias imagens de resolução espacial suficiente para identificar estruturas individuais e discriminá-las entre residencial, comercial ou industrial. Outros fatores limitantes advêm dos pressupostos relacionados à contagem. À priori são necessários: (i) uma estimativa do número médio de residentes por unidade construída (casa); (ii) uma estimativa do número de pessoas que não habitam casas, como trabalhadores temporários e migrantes; (iii) assumir que toda unidade construída contenha residentes. A maioria destas informações depende do conhecimento sobre as características locais e de observações de campo. Porém, de posse destas informações, os resultados são significativamente correlacionados com os valores de censo. Para a Carolina do Sul, Jensen e Cowen (1999) obtiveram correlações significativas ( $r^2 = 0,81$ ) ao estimar população com imagem de 2,5 m de resolução espacial.

Na Nigéria, Olorunfemi (1984) obteve 92% da variação da densidade populacional explicada por uma categoria de uso do solo (“*housing*”) mapeada a partir de fotos aéreas e um modelo matemático para conversão da área de uso do solo em contagem populacional. Diferentes modelos matemáticos foram propostos para calcular densidade de população urbana através de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução, apresentados por Lu *et al.* (2002).

Para estudos de densidade de população urbana, o sensoriamento remoto é uma ferramenta indispensável para inicialmente visualizar a extensão espacial das manchas urbanas e evoluções das mesmas, seja através do uso das fotografias aéreas (Green, 1957) ou de imagens de satélite (Chen *et al.*, 2000; Marques e Foresti, 2001). O mapeamento da densidade da população urbana através de características obtidas da análise das imagens de sensoriamento remoto, também tem sido proposto como alternativa às técnicas convencionais de representação da população (Iisaka e Hegedus, 1982; Lo, 1995; Harvey, 2002). Para a região metropolitana de Belém (Pará) foi apresentado um índice de densidade populacional, baseado em classificação digital de imagem *Thematic Mapper* - TM-Landsat, que permitiu redistribuir a população de acordo com a densidade de habitat construído. As unidades censitárias foram

desagregadas a partir das informações das imagens e os valores de correlação maiores que 0,8 evidenciaram a utilidade deste tipo de abordagem (Faure *et al.*, 2003).

Estas técnicas são interessantes ao se considerar cidades ou pequenas áreas, porém são inviáveis ao se considerar os custos em aplicá-las em nível sub-nacional ou para todo um país (Sutton *et al.*, 1997). O Programa Internacional do *U.S. Census Bureau* têm buscado alternativas metodológicas com o uso de imagens de luzes noturnas para estimar a população de países onde os dados censitários são ausentes ou deficitários (Leddy e Marthur, 2002). De modo geral, o sensoriamento remoto será mais eficiente em aplicações onde se pretende alocar a densidade populacional para uma dada área, de população conhecida, ao invés de estimar a contagem da população propriamente dita. Dados de luzes noturnas DMSP/OLS, por exemplo, foram usados para definir a extensão de áreas urbanas (com densidade maior que 1.000 pessoas por milha quadrada), de áreas peri-urbanas e de áreas rurais para todo os Estados Unidos (Weier, 2000).

O sensoriamento remoto pode ainda auxiliar o planejamento de censos identificando áreas de desenvolvimento recentes e proporcionar atualizações regulares de novas construções para os planejadores locais, como apresentado por Adinyi (1987) no planejamento do censo na Nigéria através de interpretação visual de imagens.

Alguns indicadores socioeconômicos também podem ser inferidos a partir de imagens de sensoriamento remoto, como a “qualidade de vida” por exemplo. Lo e Faber (1997) estimaram a qualidade de vida para um estado da Geórgia, E.U.A., considerando a cobertura vegetal como uma *proxy* da qualidade de vida em localidades urbanas e suburbanas. O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI), obtido a partir da imagem TM-Landsat, mostrou-se correlacionado diretamente com a renda e o valor médio da residência, e negativamente correlacionado com a densidade populacional. Em Detroit, E.U.A., Emmanuel (1997) encontrou correlação significativa entre o índice de vegetação e indicadores de declínio social, como taxas de pobreza e razão filhos/mulheres. Estes resultados enfatizam a necessidade da informação contextual na análise e no relacionamento entre as variáveis utilizadas. Pozzi e Small (2001) exploraram os padrões de vegetação e densidade populacional para áreas suburbanas nos E.U.A. e encontraram uma grande variação local entre os relacionamentos das

variáveis. Apesar destas relações não serem generalizáveis, pois dependem do contexto para o qual o indicador foi construído, indicam o potencial da utilização dos dados de sensoriamento remoto em estudos socioeconômicos.

Conforme citado anteriormente, mudanças de cobertura do solo também condicionam impactos na dinâmica populacional. A desertificação e a degradação do solo, por exemplo, são fatores que levam as populações a migrarem com destino a áreas urbanas. Em um estudo sobre fertilidade no Egito, Weeks *et al.* (2000) usaram imagens de satélite para identificar as localizações das vilas. Regiões de maior densidade de construções foram incorporadas como pontos para identificação em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A partir dos dados censitários de fertilidade, os autores desenvolveram um modelo no qual os agrupamentos espaciais das vilas, em combinação com o analfabetismo feminino e a proporção de mulheres casadas, explicava 39% da variação da fertilidade. Numa segunda análise temporal, o agrupamento espacial por si só explicou metade da variação da fertilidade. A difusão de informação entre vilas agrupadas foi um importante elemento para a redução da fertilidade.

Um exemplo de aplicação de sensoriamento remoto para entender o movimento migratório foi apresentado por Entwistle *et al.* (1998). Para jovens fazendeiros na Tailândia, o acesso à terra é vital para que tenham emprego. O direito de cultivar a terra é obtido através da abertura de áreas de floresta. Os autores associaram o cadastro de residências às áreas desmatadas observadas em imagens de satélite. Quanto mais fragmentada a paisagem, ou seja, quanto maior o número de pequenas manchas de floresta, mais escassa era a terra para novos plantios. Esta fragmentação da terra incentivou a imigração de jovens, enquanto que as regiões com maiores porções de floresta não apresentaram o mesmo movimento migratório.

## **2.2 O Sistema DMSP/OLS e a utilidade das imagens de luzes noturnas**

O Programa de Satélite Meteorológicos de Defesa (*Defense Meteorological Satellite Program - DMSP*) é um programa do Departamento de Defesa Norte Americano, administrado pelo Centro de Sistemas Espaciais e Mísseis da Força Aérea dos E.U.A. - *Air Force Space and Missile Systems Center (SMC)*, que projeta, constrói, lança e mantém vários satélites para o monitoramento meteorológico e oceanográfico. Os

satélites do programa DMSP têm órbita quase-polar, sol-síncrona, com altitude de aproximadamente 830 km. Cada satélite passa até duas vezes por dia sobre um mesmo ponto da superfície terrestre e possui período orbital de 101 minutos, proporcionando uma cobertura global a cada 6 horas. Os dados dos satélites DMSP são enviados diariamente para o Centro Nacional de Dados Geofísicos - *National Geophysical Data Center* (NGDC), Divisão de Física Solar Terrestre - *Solar Terrestrial Physics Division* (STPD), dos E.U.A., para o processamento e geração de produtos. Há dados históricos do sensor OLS desde 1992, do satélite F10, e dados OLS atuais são adquiridos a bordo dos satélites F12, F13 e F14. Maiores detalhes quanto ao programa, satélite, sistema sensor, produtos e disponibilidade de imagens podem ser obtidos na internet em <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/dmsp.htm>.

O sensor *Operational Linescan System* (OLS) é um radiômetro de varredura oscilatória que adquire imagens globais noturnas e diurnas em duas faixas do espectro eletromagnético - visível e infravermelho termal. A banda do espectro visível (VNIR: 0,4 a 1,1  $\mu\text{m}$ ) deste sensor, abrange a porção do infravermelho próximo (0,5 - 0,9  $\mu\text{m}$ ) e como seria utilizada para fins de previsão meteorológica, um tubo foto-multiplicador (*PMT*) aumenta sua sensibilidade em 4 vezes. Este fato traz como consequência adicional a capacidade de detectar "fracas" fontes emissoras de infravermelho próximo, como por exemplo luzes das cidades, chamas de gás e fogo.

O OLS gera imagens que compreendem aproximadamente 3.000 km da superfície terrestre, com duas resoluções espaciais possíveis: a resolução plena (*fine*) e a reamostrada (*smoothed*). O dado de resolução plena apresenta-se com 0,56 km de resolução espacial nominal, enquanto que o dado reamostrado, de resolução nominal de 2,7 km é resultado da gravação de valores médios de 5 x 5 *pixels* a bordo do satélite.

O processo de geração de uma imagem de luzes noturnas DMSP/OLS envolve a detecção, feita através da determinação de limiares, e o georreferenciamento das fontes emissoras de infravermelho próximo e de nuvens, a partir de uma série de imagens OLS noturnas. Ressalta-se que a imagem noturna do satélite é adquirida aproximadamente entre 20:30 e 21:30 h, horário local.

Um dos produtos gerados pelo NGDC, de interesse neste trabalho, é a imagem-mosaico, resultante da composição de cenas DMSP/OLS adquiridas em várias datas. Esta imagem permite a eliminação das áreas com cobertura persistente de nuvens e a distinção de eventos efêmeros, como fogos e relâmpagos, das luzes produzidas por fontes estáveis, como por exemplo, aquelas emitidas pelas cidades. Apenas imagens referentes às passagens de lua nova são utilizadas para o mosaico evitando-se assim o registro de reflexo de brilho da lua.

A metodologia para identificar as luzes estáveis das cidades, vilas e pólos industriais é descrita por Elvidge *et al.* (1997a). São necessários certos procedimentos para detectar e georreferenciar as fontes emissoras de radiação na porção visível do infravermelho próximo e analisar a seqüência temporal das imagens. Este método eliminou os problemas decorrentes do uso de imagens analógicas para mapear luzes das cidades. Utilizando uma única imagem OLS para mapear áreas urbanas, por exemplo, problemas de saturação de *pixel* e crescimento das bordas em função da sensibilidade do sensor, cobertura de nuvens e luzes efêmeras foram freqüentemente reportados (Welch, 1980).

Com as imagens mosaico-digitais, Elvidge *et al.* (1997a) obtiveram as luzes das cidades norte-americanas, mapeadas em células de 1 km de resolução, a partir da identificação dos focos de luzes em pelo menos 10% das observações com ausência de nuvens (de um total de 236 imagens de resolução *smoothed*). Um efeito de expansão das bordas das feições identificadas como cidade foi observado e atribuído a geolocalização do *pixel*, detecção de luzes em subpixel ou ainda, difusão da luz pela presença de *fog* ou nuvens esparsas. Estes autores ressaltam a importância da frequência dos focos de luzes para a eliminação do efeito de borda, comprometendo a identificação correta de pequenas cidades. Com a disponibilização do produto de luzes estáveis pela NOAA/NGDC (*National Oceanic and Atmospheric Administration's National Geoscience Data Center*), os problemas das luzes efêmeras e da cobertura de nuvens foram eliminados da imagem de luzes noturnas DMSP.

Para um mapeamento mais restritivo de áreas urbanizadas em sistemas de informação geográfica, Imhoff *et al.* (1997a) sugerem um algoritmo de limites de integridade espacial, na tentativa de reduzir o efeito de saturação de *pixel* e crescimento das bordas. Basicamente, o processo consiste em identificar interativamente o limiar no qual o

limite da área urbana é reduzido sem haver divisão do núcleo urbano, traduzido pelo aumento súbito do perímetro das áreas urbanas ao reduzir o limiar de classificação urbano/não-urbano. Desta forma, apenas as áreas de luzes identificadas de 89 a 100% do total das imagens utilizadas foram classificadas como urbanas.

Comparando a imagem de luzes DMSP, resultante da calibração radiométrica (níveis digitais em unidade de radiância) com aquela de luzes estáveis utilizada nos trabalhos anteriores (níveis digitais referentes à percentagem de frequência), Elvidge *et al.* (1999) observaram que a imagem calibrada proporciona detalhes espaciais de brilho, dentro das manchas urbanas. Através desta imagem calibrada evidenciaram-se regiões de grande atividade humana (zonas comerciais e industriais) não associadas a residências, permitindo ainda identificar zonas na região metropolitana. Na zona rural, foi possível detectar locais com população esparsa, da ordem de 16 habitantes por km<sup>2</sup>, apesar dos baixos níveis de luzes difusas em áreas rurais densamente povoadas. A relação linear com a população foi melhor estabelecida com a imagem DMSP calibrada quando comparada à imagem de frequência de luzes estáveis. Os autores sugerem que para muitas aplicações as luzes noturnas calibradas podem constituir um indicador mais eficiente da atividade humana ou de impactos humanos sobre o ambiente que a densidade populacional.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema sensor DMSP/OLS foi originalmente planejado pela Força Aérea Americana para a observação noturna da cobertura de nuvens e previsão meteorológica. Porém, imagens noturnas do sistema DMSP/OLS possibilitam uma visão interessante da configuração de ocupação humana no espaço geográfico, através da associação com luzes. Historicamente, Croft (1978), seguido por Kramer (1994), foram os primeiros a explorar o uso de imagens DMSP para fins de mapeamento de áreas urbanas. Welch (1980) e Welch e Zupko (1980) procuraram correlacionar imagens de luzes DMSP das cidades com a densidade populacional e o consumo de energia em áreas urbanas. Resultados promissores foram obtidos nestes trabalhos, mas apenas com a evolução da tecnologia de geração de imagens-mosaico digitais é que a imagem de luzes noturnas se apresentou como fonte de dados confiável.

Alguns trabalhos exploraram as imagens de luzes noturnas para detectar e quantificar a atividade humana. Imhoff *et al.* (1997b), por exemplo, compararam a estimativa de

soma total de área urbana estimada pela imagem DMSP com os resultados oficiais de censo nos Estados Unidos. Para tanto, usaram um limiar para converter os dados de luzes noturnas DMSP em mapa de áreas urbanizadas. Apenas os *pixels* que tiveram mais de 89% de registro de luzes noturnas, em um conjunto de 231 imagens orbitais entre 1994 e 1995 foram considerados como área urbanizada. Desta forma, o efeito de “borramento” e proximidade a corpos d’água foi reduzido e ao mesmo tempo o núcleo das áreas urbanas foi preservado. Comparando os resultados com a grade de população do censo esses autores obtiveram apenas 5% de diferença entre estas estimativas, variando nos estados, em função do tamanho das cidades.

Imagens DMSP/OLS também foram utilizadas para estimar o impacto do uso urbano na ocupação do recurso solo nos Estados Unidos (Imhoff, *et al.*, 1997b). Para este trabalho, o registro de luzes das cidades, derivado das imagens DMSP/OLS, foi integrado com dados censitários e mapas de solo em escala continental. O limiar de ocorrência de luzes noturnas para definição de áreas urbanizadas foi o mesmo adotado para o trabalho anterior (Imhoff *et al.*, 1997b), ou seja, frequência de *pixels* de luzes noturnas maior que 89%. Foi observado que 2,67% do continente americano pertencem à classe de uso de solo urbano e que grande parte desta urbanização tende a ocorrer em solos de alto potencial de produtividade para a agricultura. Os resultados indicaram a possibilidade de se estender este tipo de metodologia para avaliações globais da urbanização, população e até da produtividade.

Imagens de luzes noturnas DMSP também foram exploradas quanto às relações com a densidade de população humana. Sutton *et al.* (1997) compararam o mosaico de 231 imagens de luzes noturnas DMSP, com a grade de densidade de população (células de 1 km<sup>2</sup>) do censo nos Estados Unidos. Este trabalho não utilizou o mosaico de imagens com as percentagens de ocorrência de luzes noturnas, mas sim, o nível máximo registrado para o *pixel* livre de nuvens, que variou de 0 a 63 (imagem quantizada em 6 bits). Os autores observaram saturação dos valores DMSP para áreas urbanas densamente povoadas. Os dados DMSP subestimaram a densidade de população dos centros urbanos e superestimaram a densidade em áreas suburbanas. Foram encontradas correlações lineares significativas apenas entre a população residente e a área de luzes noturnas para os "*clusters*" urbanos. Apesar de não aconselharem o uso de dados DMSP

para estimar a densidade populacional, os autores sugerem dados DMSP como indicativos da presença humana, úteis para modelar a distribuição de população humana através de interpoladores “inteligentes” em escalas globais.

A mesma imagem de luzes noturnas do satélite DMSP/OLS, referente aos Estados Unidos, foi utilizada por Sutton (1997) para modelar a variação da densidade populacional dentro dos núcleos urbanos. A distância a partir das bordas das áreas urbanas, extraída da imagem DMSP foi correlacionada com a densidade populacional, considerando diferentes funções de decaimento. Foram definidos modelos de densidade urbana parametrizados a partir do tamanho e da forma dos núcleos definidos pela imagem DMSP e a partir da relação log-log entre os núcleos urbanos e a população dos mesmos, obtidas por Sutton *et al.* (1997).

Dados de luzes noturnas podem ainda ser utilizados para identificar assentamentos urbanos da mesma forma que imagens de alta resolução espacial, reduzindo-se o volume de dados. Elvidge *et al.* (1997b) encontraram relações indiscutivelmente lineares ao compararem a área iluminada na imagem DMSP (em escala logarítmica) com os logaritmos dos valores de população ( $R^2=0,85$ ), produto interno bruto ( $R^2=0,97$ ) e o consumo de energia elétrica ( $R^2=0,96$ ). Os autores concluem que a imagem DMSP pode ser utilizada para definir e atualizar a distribuição espacial da população em escala global, desde que seja efetuada a devida calibração regional ou nacional.

Dados DMSP/OLS também foram utilizados como variável indicativa da distribuição espacial da atividade humana em simulações da evolução dos padrões espaciais de atividades sócio-econômicas na China (Plutzer *et al.*, 2000). Utilizando o modelo gravitacional de interações espaciais e outras variáveis como acessibilidade e densidade populacional, em Sistema de Informação Geográfica, os autores simularam alguns padrões de crescimento das luzes noturnas ao longo do tempo. Os autores ressaltaram a aplicabilidade dos dados DMSP para auxiliar o planejamento de infra-estrutura e demanda de energia em escala regional.

No Brasil, imagens DSMP/OLS de luzes noturnas foram utilizada para "caracterizar a dinâmica da presença e da urbanização na Amazônia e criar um mapa das cidades e

aglomerações existentes na Amazônia" (Miranda, 1999). Segundo o autor, foram detectadas mais de 1.300 cidades de pequeno, médio e grande porte. Com uso de dados auxiliares, o total de áreas com vilas e cidades ultrapassou a 1.500. Contudo, não foram disponibilizados detalhes quanto ao produto e procedimento utilizado sobre a imagem DMSP/OLS para gerar tais resultados.

Projetos que tem por objetivo fornecer dados sobre a distribuição da população em escala global indicam os dados de luzes noturnas DMSP como valiosa fonte de informação para distribuir a população em superfícies de densidade (Turner e Openshaw, 2001). Dados de luzes noturnas DMSP referentes a núcleos de ocupação humana foram combinados com outras fontes de dados, tais como topografia, hidrografia e cobertura do solo para gerar uma superfície de densidade de população de alta resolução (Dobson *et al.*, 2000). Esta superfície (grade) proporcionou uma representação mais detalhada e precisa da densidade de população que a obtida anteriormente para dados globais. Os dados de luzes noturnas por sua natureza e resolução espacial são provavelmente, os que melhor representam a expansão urbana entre as escalas continental e global (Elvidge *et al.*, 2001a). São úteis para, por exemplo, avaliar o nível de desenvolvimento nas maiores bacias hidrográficas do mundo como apresentado pelo *World Resources Institute* (Revenga *et al.*, 1998).

Além das aplicações dos dados das imagens de luzes noturnas DMSP referentes à distribuição da população, densidade e assentamentos urbanos, há também estudos que correlacionam a área ou a resposta de brilho dos núcleos de ocupação humana observados nos dados DMSP e a energia proveniente da emissão de gases pela queima de combustíveis fósseis (Elvidge *et al.*, 1997b; Elvidge *et al.*, 1997c; Doll *et al.*, 2000). Estes estudos sugerem que a distribuição das emissões de CO<sub>2</sub> também poderia ser modelada baseando-se em dados de luzes noturnas.

### **2.3 Modelos para representar a distribuição espacial de populações**

A representação de fenômenos geográficos em ambientes computacionais prevê a adoção de um modelo. No caso da modelagem e representação computacional de dados socioeconômicos três abordagens são possíveis: (i) a associação de dados aos indivíduos, que não ser pode considerada geográfica; (ii) a agregação dos dados

individuais por unidades de área, que é a abordagem mais comum onde se incluem as representações temáticas de dados censitários; e (iii) a abordagem que considera o fenômeno socioeconômico como contínuo no espaço (Martin, 1996). A associação geográfica por área é a mais utilizada para manipular dados de população e assume que o fenômeno ocorre em regiões discretas onde as unidades de coleta de dados são internamente homogêneas. As unidades de coleta de dados são normalmente arbitrárias, como no caso dos setores censitários e não podem ser diretamente relacionados com a distribuição espacial de uma variável analisada.

Os efeitos do “problema de unidade de área modificável” – MAUP (Openshaw, 1984) são inerentes aos dados coletados através de agregação por áreas. Análises que incluam séries temporais, por exemplo, terão dificuldade em separar mudanças provenientes dos artefatos de agregação por área das verdadeiras mudanças da estrutura da população estudada (Martin e Gascoigne, 1994).

A representação através de modelos de superfície é uma tentativa de contornar a restrição dos limites de área, gerando superfícies para representar a população. A densidade populacional é considerada um fenômeno contínuo no espaço, e o objetivo é estimar a distribuição geográfica da população, no maior detalhamento possível. Algumas vantagens resultantes desta representação são as possibilidades de manipulação e análise independentemente de qualquer unidade de área pré-fixada. Adicionalmente, superfícies de densidade populacional são particularmente importantes para armazenar e disponibilizar dados demográficos em Bancos de Dados Globais.

Superfícies de densidade populacional constituem variável de entrada em modelos de simulação de mudanças de uso e cobertura do solo, como por exemplo, no modelo conhecido por **CLUE** – *Conversion of Land Use and its Effects*, e devem refletir as diferentes escalas de análise (Veldkamp *et al.*, 2002). Este modelo, de escala regional, supõe que a mudança do uso do solo (variável dependente) ocorre em função de fatores socioeconômicos e biofísicos (variáveis independentes) e estas variáveis são relacionadas a partir de regressão linear passo-a-passo, em múltiplas escalas. Outro exemplo constitui o modelo **GLASS** – *Global Assessment of Environment and Security* que se propõe a quantificar a conexão entre a mudança ambiental e a segurança humana. Este modelo funciona com sub-modelos a ele associados para calcular mudanças

globais e como estas mudanças refletem no aumento da crise na sociedade. Mudanças rápidas são as do tipo variação climática anual, culturas, disponibilidade de água e migração. Mudanças lentas são as variações de uso solo, da população susceptível e as variações nas médias climáticas de longa-escala. No sub-modelo de crise determina-se a relação entre o “stress” ambiental, suscetibilidade e ocorrência da crise para no final obter-se a análise de cenários em escala global, de 2000 a 2010, estimando-se onde e como as crises podem ocorrer. Neste modelo, as superfícies de densidade são usadas para descrever o número de pessoas em risco, a fração de população rural/urbana, a estrutura etária e o nível social (Alcamo *et al.*, 1999).

Utilizando-se somente as agregações produzidas pelo Censo, a população é representada espacialmente como uma variável associada aos limites dos municípios ou dos setores censitários. Uma análise de evolução temporal nos padrões de uso e cobertura na Amazônia, na última década, por exemplo, seria dificultada pelas alterações da divisão territorial decorrentes da criação de novos municípios e de seus setores censitários. O uso de superfícies de densidade de população onde a densidade populacional encontra-se representada nos valores de uma grade regular supera esta restrição, facilitando a implementação de modelos espaciais, uma vez que os processos são registrados e analisados em células de resolução espacial fixa. Uma medida de pressão populacional poderia, por exemplo, ser definida analiticamente como o valor absoluto do gradiente da densidade de população, o que seria facilmente calculado a partir de dados dispostos numa grade (Muehrcke, 1966).

Apresenta-se a seguir as principais técnicas de interpolação espacial para representar a população em superfícies de densidade. Neste trabalho, as técnicas de interpolação de superfícies de população serão classificadas em dois grupos de acordo com o número de variáveis envolvidas no processo. O primeiro grupo abrange os interpoladores que apenas consideram a variável população para as estimativas dos valores na superfície de saída, sejam os dados originais representados espacialmente em áreas ou pontos (centróides). O segundo grupo de interpoladores utiliza variáveis auxiliares, indicadoras da presença humana, para distribuir a população nas superfícies de densidade, incluindo os chamados “interpoladores inteligentes” ou *Smart SIM (Spatial Interpolation Methods)*.

### 2.3.1 Modelos “UNIVARIADOS” para superfície de população

Análise de tendência de superfície, krigagem, ponderação pela área, método Picnofilático de Tobler e o método de centróides populacionais de Martin são os interpoladores do primeiro grupo discutidos a seguir.

Uma das primeiras técnicas utilizadas para gerar superfícies de densidade populacional é a análise de tendência da superfície. A superfície é calculada através do ajuste de um polinômio aos dados pontuais, utilizando-se de uma regressão múltipla dos valores do atributo em função da localização geográfica. O polinômio é então usado para estimar os valores da grade. A análise de tendência é sensível à existência de *outliers* nos dados e são funções suaves. É considerado um interpolador global, pois assume que a tendência geral da superfície é independente de erros aleatórios encontrados em cada ponto amostrado. O atributo  $z$  num dado ponto  $(x,y)$  na superfície é dado pela equação de  $z$  em função de  $x$  e  $y$ . Este método gera superfícies arredondadas, padrão difícil de se observar em aplicações físicas e humanas, e é mais adequado para superfícies com tendências lineares e poucas inflexões como em estudos geofísicos e morfo-estruturais.

Outro método simples de interpolação espacial é o ponderado pela área que atribui valores de densidade de população na grade de saída, proporcionais à área de intersecção da grade com as zonas ou unidades de mapeamentos. A superfície resultante conterá limites abruptos entre as unidades e valores constantes dentro das unidades. Os erros serão maiores quanto mais agrupada for a distribuição da variável a ser interpolada e quanto menor forem as regiões de destino em relação às regiões de origem

A técnica da krigagem, interpolação para processos espaciais aleatórios, estima a ocorrência de um processo estocástico a partir de observações do mesmo processo em outros locais. A diferença dos valores para uma determinada variável registrada em dois pontos distintos depende somente da distância entre eles. Assim, identifica-se uma função que explica esta distribuição. A partir desta função pode-se gerar uma grade que atribuirá valores para toda a superfície (Cressie, 1993). É um método muito utilizado nas ciências da Terra para fenômenos com correlação espacial determinante. Não há posição geográfica sem valores da variável interpolada. Sendo assim, é uma superfície imprecisa para ser utilizada como variável numa modelagem, porém descreve uma visão

sinóptica do processo, indicando grandes tendências da distribuição da variável. A krigeagem foi utilizada como método de análise de dados demográficos para os municípios da região metropolitana da Baixada Santista-SP (Jakob, 2002). Para este autor, a técnica da krigeagem se destacou como alternativa para analisar a tendência das variáveis socioeconômicas estudadas, no caso a segregação espacial.

Os métodos até o momento descritos apresentam duas limitações: não preservam o volume populacional correto na superfície de saída e são incapazes de reconstruir regiões sem população. No interpolador proposto por Tobler (1979) denominado Picnofilático, a questão do volume final na superfície é resolvida através de uma técnica de construção de superfície baseada nos centróides geométricos das zonas ou unidades censitárias. Este método é uma extensão do método de ponderação por área, onde os valores da grade são ponderados pela distância ao centróide. A superfície interpolada é suave e a soma (ou a massa) dos valores é mantida consistente com os dados originais. A geração de superfície de densidade a partir do interpolador Picnofilático de Tobler promove a suavização dos limites entre as unidades, semelhante ao efeito da aplicação de um filtro de média (Figura 2.1). O interpolador assume que a função de densidade populacional é concêntrica em torno do centróide geométrico de cada zona e compartilha a característica dos outros modelos ao indicar a presença de população em todas as localidades no plano. Ou seja, não há células sem população, não há pontos na grade com valores iguais a zero para a interpolação. Apresenta a vantagem de manter corretamente o total de população regional e de usar não apenas os centróides, mas os limites regionais, levando em consideração os valores de áreas geográficas adjacentes.

No projeto de demografia global (*The Global Demography Project* - 1995), de responsabilidade do *National Center for Geographic Information and Analysis* (NCGIA), dados populacionais foram compilados e superfícies de densidade foram geradas constituindo um banco de dados populacional global, baseado em Sistemas de Informação Geográfica (Tobler *et al.*, 1995). As superfícies compõem-se de células de 5' x 5' com a população projetada para 1994, geradas através do algoritmo Picnofilático de Tobler.

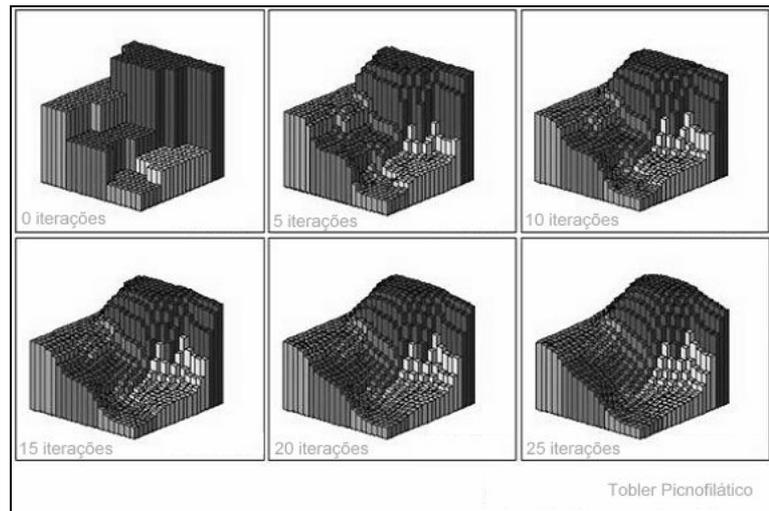


Figura 2.1 - Interpolador Picnofilático de Tobler.  
 FONTE: Tobler (1979).

Outro exemplo de uso do interpolador Picnofilático de Tobler encontra-se no projeto *Gridded Population of the World (GPW)*, desenvolvido pelo *Center for International Earth Science Information Network (CIESIN)*. A densidade populacional foi inicialmente obtida a partir de dados censitários de 1967 a 1999, e as superfícies de densidade populacional foram disponibilizadas por país (Deichmann *et al.*, 2001). Na sua primeira edição, o GPW1, a superfície de densidade refletia a estimativa da população para o ano de 1994, em células de 5' x 5' de latitude e longitude, geradas a partir do método interpolador de Tobler Picnofilático. Na segunda edição, o GPW2, buscou-se melhorar a resolução espacial e gerar melhores estimativas de população para cada unidade. Nenhuma modelagem da distribuição da população foi aplicada para gerar as superfícies. Houve apenas uma alocação proporcional à área. As superfícies refletem estimativas da densidade populacional para 1990 e 1995, em células de 2,5' x 2,5' de latitude e longitude, aproximadamente 5 km.

Os modelos apresentados a seguir, baseados em *kernel*, centróides populacionais e os interpoladores inteligentes, geram superfícies de densidade populacional onde não há a obrigatoriedade de se interpolar valores para todas as células da grade. É prevista a ocorrência de células onde a densidade de população pode ter valor igual a zero ou ausência de valor.

Modelos para gerar superfícies a partir do uso de *kernel* sobre valores pontuais foram inicialmente descritos por Martin e Bracken (1991) e Bracken (1994). Nestes modelos, os centróides são atribuídos para cada zona ou unidade de coleta de dados e um *kernel* (função bivariada para estimar a intensidade do padrão pontos) é aplicado à superfície de uma maneira uniforme para gerar a superfície de densidade de saída.

Martin (1989) desenvolveu um método interpolador específico para compensar os problemas do mapeamento censitário do Reino Unido a partir das unidades – ED (*Enumeration Districts*), através de centróides ponderados. Os centróides que representam os locais de maior concentração da população são posicionados “visualmente” e fazem parte da base de dados censitários. O objetivo é redistribuir a contagem do censo associada aos centróides em células de uma grade regular reconstruindo a geografia da distribuição e mantendo as áreas não populadas na superfície final. Os dados são transformados a partir da representação em zonas, formato original dos dados, para o formato de superfície conforme ilustrado na Figura 2.2.

Uma grade regular é sobreposta à área a ser modelada e uma re-distribuição com *kernel* é posicionada sobre o centróide. O alcance, ou a largura do *kernel* é ajustada inicialmente de acordo com a densidade local de centróides. O *kernel* é adaptativo à estrutura da população local, ou seja, em regiões pouco populadas não há alteração na largura do *kernel* e em regiões de alta densidade, a largura do *kernel* é reduzida proporcionalmente, podendo cobrir somente uma parte da célula da grade de saída. Os pesos são atribuídos a cada célula compreendida pelo *kernel* de acordo com uma função de decaimento com o aumento da distância. Estes pesos são usados para redistribuição da contagem total (de população, moradias, desempregados, etc.) a partir da localização do centróide para as células adjacentes. A largura do *kernel* influenciará a extensão das áreas com população no modelo resultante, enquanto que a forma da função de decaimento com a distância afetará a distribuição da população dentro destas áreas. Após cada centróide ter sido visitado, muitas células serão mantidas sem população, enquanto outras em regiões densamente populadas receberão a população de mais de um centróide. Bracken e Martin (1995) descreveram o uso deste interpolador para a construção da série de modelos de população referentes à Inglaterra, País de Gales e

Escócia para contagens derivadas dos censos de 1981 e 1991. A evolução da modelagem, incluindo a Irlanda deu origem ao software Surpop, que disponibiliza interfaces na internet para geração de superfícies (Martin *et al.*, 1998).

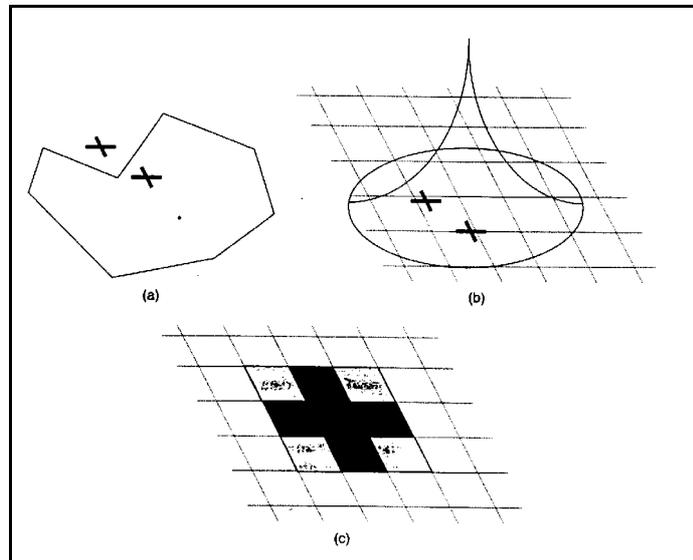


Figura 2.2. Redistribuição da população através dos centróides zonais: a) zona e centróides adjacentes; b) grade regular sobreposta à região e um modelo *kernel* centralizado sobre o centróide corrente; c) os pesos do *kernel* redistribuem a contagem nas células da grade resultante.  
 FONTE: Martin (2002).

Pina (2001) avaliou a técnica de interpolação espacial definida pelo Método de Martin de centróides populacionais para geração de superfícies de densidade a partir de dados censitários pontuais de contagem populacional numa região do Rio de Janeiro. A análise visou determinar o tamanho ótimo da janela e o tamanho ideal das células da grade, além de indicar o melhor modelo através da comparação entre as várias simulações de centróides geométricos com imagens de satélite e o mapa temático dos setores censitários. Os resultados indicaram o método como uma alternativa para o tratamento de dados populacionais ao se comparar superfícies de densidade de população em análise temporal. Neste caso, deve-se ponderar a variação da densidade de pontos no tempo, uma vez que o método mostrou-se sensível à densidade e distribuição dos pontos amostrais.

### 2.3.2 Modelos “MULTIVARIADOS” para superfícies de população

O segundo grupo de interpoladores discutido utiliza variáveis auxiliares, indicadoras da presença humana, para distribuir a população nas superfícies de densidade. Como descrito por Goodchild *et al.* (1993), a chave para interpolar dados sócio-econômicos de uma representação para outra é estimar uma superfície contínua subjacente: uma superfície intermediária que suporte e seja a base para distribuir a variável em questão.

Uma maneira de estimar a distribuição da população é através de métodos dasimétricos, definidos como qualquer forma de mapeamento onde o atributo reportado é redistribuído dentro de zonas originais, tomando-se como base informações obtidas em dados externos auxiliares. O objetivo é criar limites de densidade para a variável mapeada mais próximos de sua verdadeira distribuição geográfica, do que o usualmente apresentado em um mapa temático, que impõe os limites das zonas de agregação para apresentar a variável. Langford *et al.* (1991) usaram um método de modelagem baseado em regressão para criar estimativas de densidade populacional considerando várias categorias de cobertura do solo. A limitação deste método encontra-se em não preservar o volume na superfície modelada.

Langford e Uwin (1994) adaptaram o método dasimétrico para gerar superfícies utilizando-se de informação resultante da classificação de uso do solo por imagens de satélite. Fisher e Langford (1995) usaram a divisão binária de áreas ocupadas e não-ocupadas nas zonas de origem. Às áreas não-ocupadas foi atribuído o valor zero de densidade populacional, de modo que a população total da zona se concentrou nas áreas ocupadas e garantiu a preservação do volume. Contudo, caso não sejam definidas áreas ocupadas pelos dados externos, não será possível alocar a população da zona.

Outra maneira de evitar problemas de preservação de volume e redistribuição de população na superfície resultante é através de ponderação pela da área de diferentes classes de uso. Spiekermann e Wegener (2000) descrevem o método para desagregar população e índices de emprego a partir de dados zonais utilizando classes de uso do solo como fator de peso para a desagregação (Figura 2.3).

Martin *et al.* (2000) desenvolveram um método híbrido que incorpora diferentes métodos dasimétricos para a construção de modelos de superfícies de população descontínuas, baseados em dados de censo e sensoriamento remoto para a Irlanda do Norte. A informação de cobertura do solo derivada da classificação de uma imagem Landsat TM foi usada para redistribuir a população dentro dos setores censitários (ED - *enumeration districts*). A partir de um mapa binário, resultante da classificação, foi proposta uma equação de regressão linear, considerando a proporção de área construída e não construída, para redistribuir a população em cada ED. Os termos da equação foram as estimativas globais e relativas da densidade populacional nos *pixels* de área construída ou não-construída.

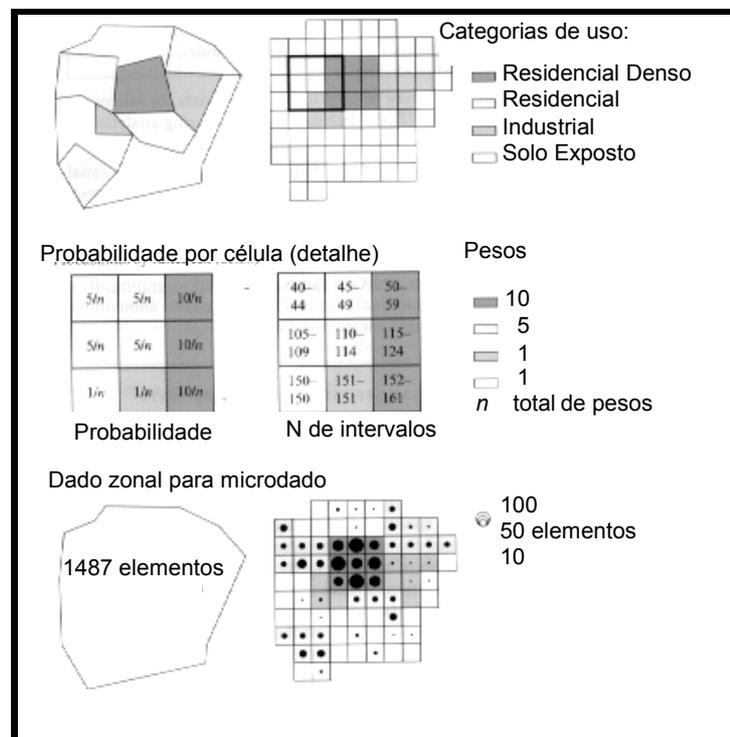


Figura 2.3 – Desagregação de dados zonais em células.  
FONTE: Spiekermann e Wegener (2000).

Analogamente aos métodos dasimétricos, Deichmann e Eklundh (1991) descreveram um *Smart SIM (Spatial Interpolation Methods)* para interpolar dados censitários de população usando informações disponíveis em mapas digitais de localização e tamanho de assentamentos urbanos e outras feições físicas relacionadas à densidade populacional. O interpolador é considerado “inteligente” porque usa informação

espacial de outras fontes para orientar a interpolação. Estas informações são manipuladas de modo a compor uma superfície de ponderação que “mapeia” os dados originais na superfície de saída.

O projeto *LandScan* constitui outro exemplo de interpolador “inteligente”, onde dados censitários globais foram redistribuídos em células de 30” x 30”, o que equivale a aproximadamente 1 km no Equador (Dobson *et al.*, 2000). O modelo de população utilizado considerou as variáveis proximidade de estradas, uso do solo e luzes noturnas para definir um coeficiente de probabilidade que distribui a população em uma superfície. Representa desta forma não apenas a população residente, mas o conceito de população em risco ou a chamada “*ambient population*” que integra movimento diurno e hábitos de movimentos coletivos em uma única medida. O objetivo ao criar esta superfície foi prover informações para medidas emergenciais no caso de desastres naturais ou decorrentes de atividade humana. Este projeto segue desenvolvendo superfícies de população atualizadas, para escalas mais detalhadas, diferenciando a distribuição da população diurna e noturna (Bhaduri *et al.*, 2002).

As críticas que são feitas aos métodos interpoladores ditos inteligentes advêm da simplicidade e da subjetividade empregada no estabelecimento de relações entre as variáveis preditoras, indicativas de densidade populacional, e a variável de interesse, no caso, população. A fragilidade ou robustez do interpolador depende dos critérios adotados para a seleção das variáveis indicadoras e as inter-relações com a população.

Durante o projeto Medalus III, Turner e Openshaw (2001) desenvolveram interpoladores “mais inteligentes” (*Smarter SIM* e *Clever SIM*) que além de usar variáveis auxiliares para alocar a população, fazem uso de redes neurais para representar as relações entre as variáveis preditoras e a variável que está sendo interpolada. Neste caso, uma rede neural é treinada para estimar os valores de saída baseando-se nas variáveis de entrada, através de um exemplo, ou seja, dos dados de treinamento. Uma vez a rede treinada, outras áreas serão mapeadas seguindo o mesmo critério. O treinamento das redes neurais é um processo computacionalmente custoso, porém fundamental para o sucesso de mapeamento em outras áreas. A superfície de densidade gerada é resultante de uma “caixa-preta” pois é muito difícil entender o significado dos parâmetros internos para mapear os dados de entradas nas superfícies de saída.

Novamente, o uso de interpoladores inteligentes será tão eficiente quanto mais precisa for a escolha das variáveis e o conhecimento das inter-relações entre elas.

Interpoladores inteligentes e seus variantes apresentam-se como métodos promissores para desagregar a população na Amazônia, redefinindo a densidade populacional no interior dos limites municipais. Para tanto, é fundamental a definição de um modelo que indique quais variáveis são indicadoras da presença humana e qual a relação entre estas variáveis. A exemplo da superfície gerada pelo *LandScan*, seria necessário adaptar o modelo genérico criado para representar a população “em risco” de todo o globo para a expressar a densidade populacional na Amazônia. Uma vez definido o conjunto de variáveis e a importância relativa de cada uma, será necessário utilizar dados auxiliares para representar estas variáveis. A qualidade e a exatidão da superfície resultante será diretamente influenciada pela qualidade dos dados.

Alguns estudos apresentam comparações entre as técnicas de interpolação para definir superfícies de densidade populacional. Seis modelos, utilizados para distribuir a população nos *Enumeration Districts* - EDs na Irlanda do Norte foram comparados por Martin *et al.* (2000): o modelo dasimétrico baseado em imagem TM-Landsat descrito anteriormente, o modelo de centróides ponderados original (Surpop), e quatro inovações do Surpop. Estas inovações referem-se a inclusão de medidas de dispersão, e a inclusão do código postal nos dados de origem. Todos os métodos tiveram melhor desempenho na área urbana, uma vez que na área rural os centróides representam populações maiores, dificultando a reconstrução de um padrão de distribuição. O método dasimétrico foi o de melhor desempenho ao se avaliar a reconstrução da população total do ED. De modo geral, os maiores erros ocorreram em áreas urbanas onde os EDs tinham dimensões menores que a resolução da célula da grade. As técnicas mostraram-se sensíveis à resolução espacial e populacional dos dados de entrada, ou seja, a qualidade do dado é mais importante que os detalhes dos algoritmos. Os autores ressaltam ainda o potencial da combinação de diferentes abordagens de acordo com o tipo de região a ser modelada, principalmente para dados históricos ou dados censitários.

Ao compararem o desempenho dos interpoladores Picnofilático de Tobler, ponderado pela área e os interpoladores inteligentes, Turner e Openshaw (2001) observaram um

melhor desempenho dos interpoladores inteligentes. Alertam, porém para o fato dos interpoladores inteligentes serem dependentes da existência de dados auxiliares para guiar corretamente a interpolação.

### CAPÍTULO 3

## MOSAICO DE IMAGENS DE LUZES NOTURNAS DMSP/OLS E A DETECÇÃO DE ATIVIDADES HUMANAS NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA

Caracterizar ou avaliar a região Amazônica quanto aos processos atuantes, seja para fins de preservação ambiental ou definição de políticas públicas de desenvolvimento não constitui tarefa trivial. A dimensão da Amazônia Legal, aliada à intensidade dos fenômenos de colonização e urbanização nas últimas décadas, impõem a necessidade de informações sinópticas, atualizadas e que descrevam estes fenômenos em diferentes escalas de análise. Por estas características, o sensoriamento remoto é uma opção natural para gerar dados contemplando as mais variadas escalas e aplicações.

Imagens de luzes noturnas do sistema DMSP/OLS foram indicadas como uma alternativa aos sistemas de maior resolução espacial para identificar assentamentos urbanos (Elvidge *et al.*, 1997b), com a vantagem de se trabalhar com um menor volume de dados. Porém, não há referências da validade destas imagens em regiões de baixa densidade demográfica, ao contrário, os estudos consideraram regiões densamente povoadas, como o estado da Califórnia, E.U.A., ou o próprio Estados Unidos (Imhoff, *et al.*, 1997a; Sutton, 1997 e Sutton *et al.*, 1997).

Diante do exposto, apresenta-se a seguir o primeiro estudo do mosaico de imagens de luzes noturna DMSP/OLS, quanto a sua capacidade de detectar a presença humana na Amazônia Legal. Baseado em dados auxiliares, desenvolveu-se um procedimento para avaliar o tipo de informação presente no mosaico de imagens DMSP-1999. Verificou-se a correspondência entre a posição geográfica dos focos de luzes noturnas e as localidades urbanizadas (sedes de municípios, distritos e vilas). A seguir, foi realizada uma análise exploratória das relações entre as áreas dos focos de luzes noturnas, as áreas das manchas urbana, dados censitários de população e dados de consumo de energia elétrica.

### 3.1 Procedimentos metodológicos para análise do mosaico de luzes noturnas

#### 3.1.1 Elaboração da base de dados

Para verificar a potencialidade das luzes noturnas na Amazônia Brasileira utilizou-se um mosaico do satélite DMSP/OLS fornecido pelo NGDC/NOAA. Este mosaico é resultante de 16 cenas do mês de setembro de 1999 (de 02 a 18/09/1999). Foram eliminados os registros de radiância efêmeros (como nuvens e queimadas), restando apenas os registros de emissões espacialmente estáveis. Os níveis digitais do mosaico representam a porcentagem de frequência de detecção de luz para um dado *pixel*. Para integrar o mosaico ao banco de dados existente em sistema de informação geográfica foi realizada a conversão de projeções. Assim, o mosaico fornecido na projeção Cilíndrica Equidistante, Datum WGS-84 e de resolução espacial de aproximadamente 1 km<sup>2</sup> (0.00833 x 0.00833 graus), foi convertido para a projeção Policônica, Datum SAD/69. Nenhum outro procedimento de correção geométrica (registro), além da conversão citada, foi realizado sobre a mesma.

O histograma do mosaico (imagem quantizada em 8 bits) indicou níveis digitais válidos a partir do valor sete. Assim, a primeira binarização saturou em 0 os valores abaixo do nível digital 7 e em 255 os valores acima de 7 (ou 7%). Contudo, comparando-se as manchas urbanas identificadas nas imagens TM-Landsat do Mosaico do Brasil (MCT, 2003) com aquelas delineadas a partir do mosaico DMSP, observou-se que na última as áreas urbanas estavam extrapoladas. Para preservar a identificação correta dos limites dos grandes centros urbanos, evitando-se que as pequenas cidades deixassem de ser detectadas, Imhoff *et al.*, (1997b) sugerem um limiar de 89%, acima do qual seriam registrados os centros urbanos. Este valor de limiar foi proposto para um mosaico anual, de 236 imagens. Contudo, o mosaico DMSP utilizado neste trabalho considerou apenas 16 imagens.

Avaliando-se empiricamente diferentes limiares e as respectivas manchas urbanas resultantes, foi definido um limiar de 30%. Este limiar foi suficiente para manter o compromisso entre a detecção de pequenas cidades e a saturação da ocorrência de luzes nos grandes centros urbanos. O efeito dos diferentes limiares para a delimitação de regiões urbanizadas é ilustrado na Figura 3.1. Observa-se a região de Belém (PA), onde



procedimento atualiza o atributo "Luzes\_DMSP" para cada município do banco de dados.

Dados de consumo de energia elétrica por município também foram incorporados ao banco de dados. Estes dados foram fornecidos pelas diferentes companhias de eletricidade que abastecem os estados do Pará, Amazonas, Acre, Amapá e Rondônia. Os dados de energia detalham o consumo, em kWh, para o ano de 1999 de acordo com o tipo (hidroelétrica ou termoelétrica) e categoria de consumidores (residencial, industrial, comércio, rural, iluminação pública, poder público, serviço público, consumo da própria companhia e total).

Os focos de luzes DMSP, após a classificação foram transformados em polígonos. Cada foco recebeu uma identificação única, constituindo-se em objetos no banco de dados. Este procedimento facilitou a verificação da consistência entre os focos de luzes DMSP e o tipo de cobertura correspondente na superfície.

### **Correspondência entre luzes DMSP e atividades humanas**

Para verificar os focos de luzes DMSP que não estavam inicialmente associados a nenhuma sede de município identificada pelo IBGE, utilizou-se outro conjunto de dados auxiliares. Este conjunto é composto pelos mosaicos de imagens TM-Landsat de 1998 e 1999, mosaico de imagens de radar JERS1 (Japanese Earth Resources Satellite) e os limites municipais e estaduais, disponíveis no Mosaico do Brasil (MCT, 2003).

Ao se confirmar a correspondência dos focos de luzes com as manchas urbanas, as localizações geográficas das sedes de município foram atualizadas no banco de dados. Contudo, esta correção limitou-se a localidades para as quais haviam imagens TM-Landsat disponíveis.

### **Correspondência entre luzes DMSP e área urbanizada**

Para verificar as relações estatísticas entre luzes DMSP e as áreas urbanizadas foram utilizadas imagens do satélite TM-Landsat como referência da extensão das manchas urbanas. A distinção das manchas urbanas foi possível tanto pela resolução espacial de 30 m, quanto pela separabilidade espectral das áreas urbanas. A banda 3 do sensor TM,

que corresponde ao intervalo de 0,63  $\mu\text{m}$  a 0,69  $\mu\text{m}$ , na faixa visível do vermelho, no espectro eletromagnético, permitiu discriminar as manchas urbanas referentes às sedes dos municípios.

Como não se dispunham de imagens TM-Landsat de resolução plena (30 m) para cobrir todo o estado do Pará, optou-se por realizar esta análise para os 118 municípios do estado do Mato Grosso. Assim, imagens referentes ao estado do Mato Grosso, banda 3 TM-Landsat, referentes à época seca do ano de 1999, foram registradas para projeção Policônica. Dentre as técnicas de processamento de imagem, realizou-se apenas um realce linear de contraste para evidenciar as manchas urbanas. A extração destas manchas foi feita através de interpretação visual da banda TM-3 diretamente sobre a imagem digital. Esta interpretação foi orientada pela localização dos centros urbanos fornecida pelo IBGE e utilizou como dado auxiliar a imagem Landsat de 1999, composição colorida TM-3, TM-4 e TM-5, nos canais azul, verde e vermelho respectivamente, do Mosaico do Brasil. Desta forma, um polígono referente à mancha urbana foi definido para cada sede de município. O valor de área para as manchas urbanas, calculado automaticamente pelo SIG, tornou-se mais um atributo do município na estrutura do banco de dados para ser comparado à área dos focos de luzes DMSP.

## **3.2 Resultados da análise do mosaico de luzes noturnas DMSP**

### **3.2.1 Luzes DMSP e a localização das sedes de municípios**

A análise visual entre os centros urbanos e as áreas das luzes do mosaico DMSP indicou uma adequada correspondência de posicionamento entre os dados: a maioria dos focos de luzes contém um centro urbano correspondente (Figura 3.1). Ao definir-se um limiar de 7% (níveis digitais-ND maiores ou iguais a 7) foram encontrados 560 focos de luzes para a Amazônia Legal, e apenas 258 focos, considerando-se o limiar de 30%.

Para minimizar possíveis erros de posicionamento foram computados os focos de luzes que continham os centros urbanos e os focos de luzes a menos de 5 km dos centros. Dos 258 focos de luzes DMSP identificados, 149 continham os centros urbanos fornecidos pelo IBGE e 64 estavam a menos de 5 km dos centros, totalizando 213 focos coincidentes. Dos 258 focos de luzes DMSP, 45 focos não corresponderam à restrição

espacial proposta (conter centros urbanos ou estar a menos de 5 km de um centro). Utilizando-se os dados auxiliares do Mosaico do Brasil, verificou-se a correspondência dos focos de luzes DMSP a algumas atividades, conforme resumido na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Descrição dos focos de luzes noturnas DMSP não coincidentes com centros urbanos fornecidos pelo IBGE.

| <b>Descrição - observado no mosaico TM-Landsat</b>               | <b>Nº de focos</b> |
|--|--------------------|
| Assentamentos urbanos vilas/povoados não discriminados pelo IBGE | 9                  |
| Vilas reconhecidas – IBGE  | 3                  |
| Núcleos urbanos próximos a grandes centros                       | 4                  |
| Vilas próximas a barragens                                       | 2                  |
| Áreas de mineração/garimpo                                       | 3                  |
| Pólo Petroquímico/similar (Urucu-AM)                             | 1                  |
| Erro de localização dos centros urbanos - IBGE                   | 16                 |
| Sem verificação - Ausência de imagens TM-Landsat ou JERS1        | 7                  |

Estes resultados comprovaram que a detecção de luzes DMSP esteve associada à presença da atividade humana, mesmo em locais aos quais não se pode atribuir uma população residente. As luzes indicaram atividades que requerem infra-estrutura, como mineração ou pólo petroquímico.

### **3.2.2 Efeitos do mosaico DMSP**

Durante o procedimento de geração do mosaico DSMP alguns efeitos foram incorporados à imagem resultante. Estes efeitos são prejudiciais para a análise comparativa dos focos de luzes com outros dados, e não são facilmente detectados/eliminados do mosaico. Estes efeitos, descritos a seguir, podem ser consequência, principalmente de expansão de bordas, contágio por fontes próximas e proximidade a margens de rios/mares.

#### **Expansão de bordas**

Como o mosaico resulta de várias cenas de diferentes datas, a localização geográfica dos *pixels* de borda pode ter variações de uma cena para outra. Isto ocasiona a expansão do limite real dos focos de luzes, aumentando cidades pequenas e expandindo as bordas de cidades grandes (Figura 3.2).

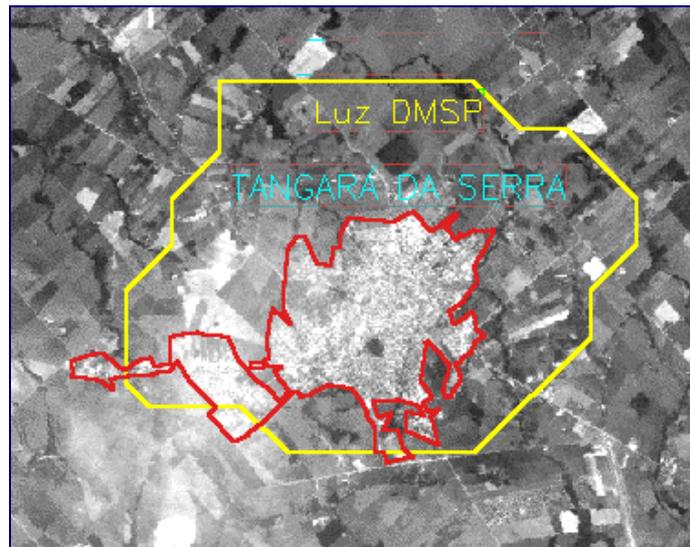


Figura 3.2 - Efeito da expansão de borda para luzes DMSP no limite da área urbana.

### **Contágio por fontes próximas**

Fontes luminosas muito próximas podem ser unidas pelo efeito do mosaico e eventualmente, apresentar focos maiores dos que seriam identificados se estivessem distantes (Figura 3.3). Deste efeito resultam focos únicos que representam dois ou mais municípios, principalmente nas regiões metropolitanas, num fenômeno semelhante à conurbação. A Serra dos Carajás no Pará é outro exemplo onde o foco de luz da vila é contaminado pela mina de ferro muito próxima e iluminada.

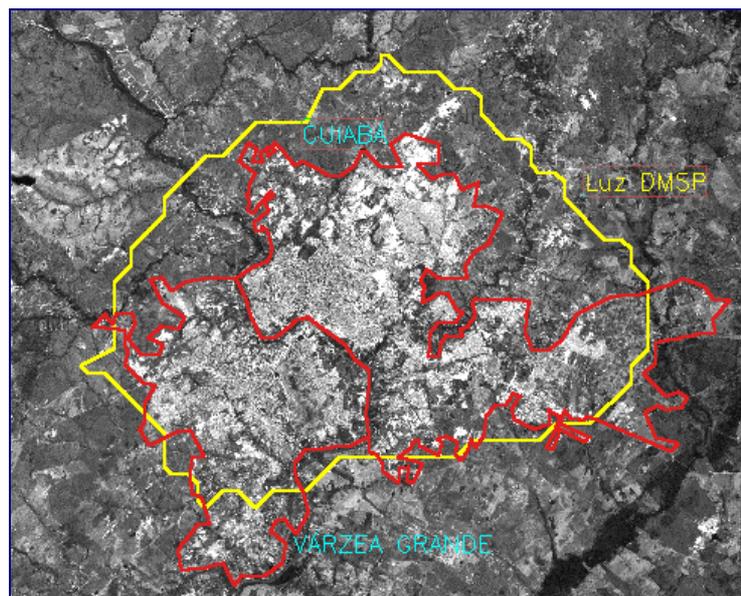


Figura 3.3 - Efeito de contágio para luzes DMSP - conurbação.

### Margens de rios/mares

Áreas urbanizadas localizadas nas margens de rios ou na costa normalmente apresentam uma fronteira abrupta entre as luzes DMSP, intensas próximas da orla, e a água. Porém a água reflete parte da luz da orla. Nestes casos, o mosaico DMSP tende a apresentar focos muito maiores para estas fontes emissoras, tanto pelo efeito do mosaico, como pelo reflexo da água. Um exemplo foi observado em Mosqueiro, balneário de Belém (PA) apresentado na Figura 3.4.

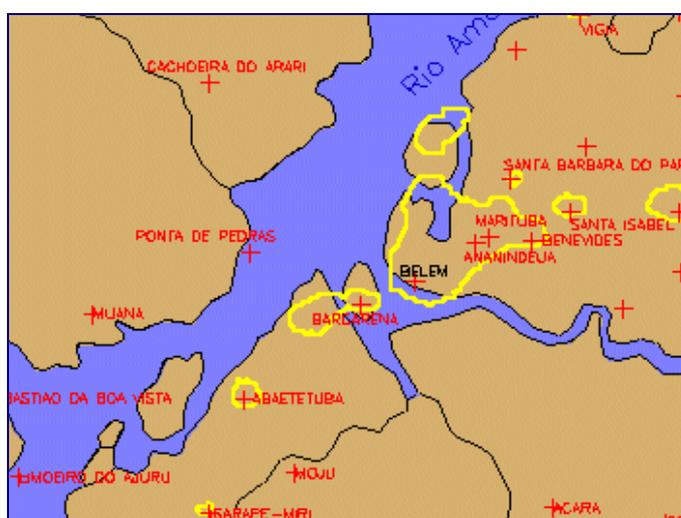


Figura 3.4 - Efeito de margens de rio para focos de luzes DMSP.

Todos estes efeitos devem ser considerados ao se utilizar mosaico DMSP, uma vez que podem mascarar os resultados provenientes dos focos de luzes.

### 3.2.3 Área da mancha urbana e luzes DMSP

Foram detectados focos de luzes DMSP para 56 dos 118 municípios do estado do Mato Grosso. A área urbana de cada município, definida a partir da TM-3 Landsat, foi comparada à área do foco de luz identificado na imagem DMSP. O resultado da comparação evidencia uma relação linear entre as áreas urbanas e os focos de luzes DMSP, com coeficiente de correlação linear de 0,95 (Figura 3.5a). Retirando-se a região metropolitana de Cuiabá, obteve-se coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,76. Todas as regressões lineares apresentadas neste trabalho foram significativas a 95% de intervalo de confiança.

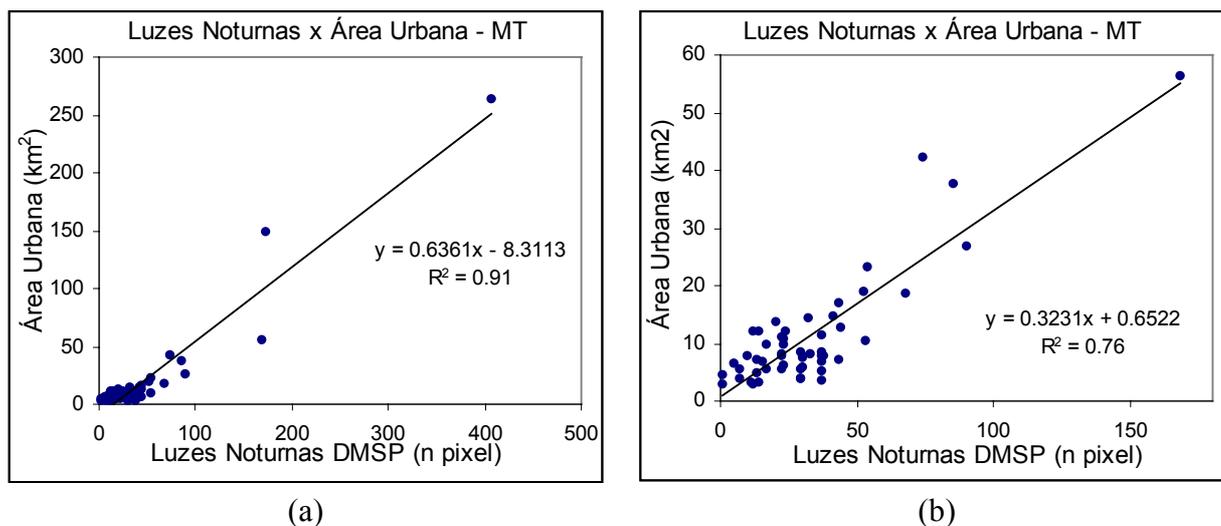


Figura 3.5 - Relação entre área da mancha urbana e luzes noturnas DMSP verificada para (a) todos os municípios do estado do Mato Grosso com luzes noturnas e (b) excluindo-se a região metropolitana de Cuiabá.

Este resultado confirmou a hipótese de que a presença de luzes noturnas, detectadas pelo sistema DMSP, encontra-se diretamente relacionada à extensão da mancha urbana. Dificilmente na zona rural a presença de luzes seria tão intensa em potência ou extensa em área para sensibilizar um *pixel* de 1 km do mosaico. Desta forma, pode-se afirmar que os focos de luzes referentes a assentamentos humanos ou cidades contém dimensão (área) proporcionais à área de infra-estrutura urbana, tais como arruamento, casas e construções civis que emitem luz.

### 3.2.4 População residente e luzes DMSP

Dentre os 749 municípios da Amazônia Legal considerados<sup>3</sup>, 186 estão contidos nos focos de luzes e 62 estão a menos de 5 km dos focos, perfazendo um total de 248 municípios detectados no mosaico DMSP. Considerando a distribuição dos municípios da Amazônia Legal de acordo com intervalos de população total, observa-se que a partir da classe 2.000-5.000 habitantes, o município foi detectado no mosaico DMSP (Tabela 3.2). Porém, apenas a partir de 100.000 habitantes todas os municípios foram detectados. Municípios com população entre 5.000 e 100.000 habitantes foram parcialmente detectados pelos focos de luzes DMSP.

<sup>3</sup> Dentre os 756 municípios da Amazônia Legal, 7 municípios do Maranhão não foram considerados para as análises deste capítulo.

TABELA 3.2 - Municípios da Amazônia Legal que apresentaram luzes DMSP, por classes de população total - 1996.

| População Total - 1996     | Número de Municípios |                |
|----------------------------|----------------------|----------------|
|                            | Amazônia Legal       | Com luzes DMSP |
| 0 - 2000                   | 32                   | 1              |
| 2.000 - 5.000              | 133                  | 5              |
| 5.000 -10.000              | 180                  | 28             |
| 10.000 -20.000             | 206                  | 67             |
| 20.000 -50.000             | 145                  | 96             |
| 50.000 - 100.000           | 36                   | 34             |
| 100.000 - 200.000          | 7                    | 7              |
| 200.000 -500.000           | 7                    | 7              |
| 500.000 - 1.000.000        | 1                    | 1              |
| > 1.000.000                | 2                    | 2              |
| <b>Total de Municípios</b> | <b>749</b>           | <b>248</b>     |

O mosaico DMSP não detectou 501 centros urbanos, sendo Santa Luzia (MA) o município mais populoso com 53.287 habitantes no total e 19.450 habitantes na área urbana. A ausência de imagem TM-Landsat livre de nuvens para este município no Mosaico do Brasil comprova o problema de cobertura de nuvens freqüente. Alta Floresta (MT) foi o município de maior população urbana (35.053 habitantes, dos 42.852 de população total) que não teve suas luzes detectadas pelo mosaico DMSP. A presença de fumaça decorrente de queimadas pode ter ocasionado a ausência de luzes noturnas uma vez que, com um limiar 7% as luzes da cidade foram detectadas.

Ainda, deste total de 501 municípios sem focos de luzes DMSP, apenas 25 deles possuem população urbana maior que 10.000 habitantes. Com exceção de Alta Floresta e Rosário do Oeste, ambas no Mato Grosso, os demais municípios encontram-se nas regiões mais ao norte, nos estados do Acre, Amapá, Pará e Maranhão onde a questão da cobertura de nuvens é crítica.

Considerando-se os 248 municípios com registro de luzes DMSP, Paço do Lumiar (MA) apresentou a menor população urbana - 1095 habitantes. Porém, encontra-se em um grande foco de luz, juntamente com as sedes dos municípios de São José do Ribamar e São Luís, na região metropolitana da capital. A cidade de menor população

urbana detectada independentemente de outro centro foi Alto Alegre (RR) de 3.292 habitantes urbanos.

Considerando-se todos os municípios que apresentaram focos de luzes DMSP na Amazônia Legal, e a população total e urbana dos mesmos, procedeu-se a análise de regressão linear. Foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) igual 0,59 para a população total (Figura 3.6) e igual a 0,6 para população urbana (Figura 3.7)

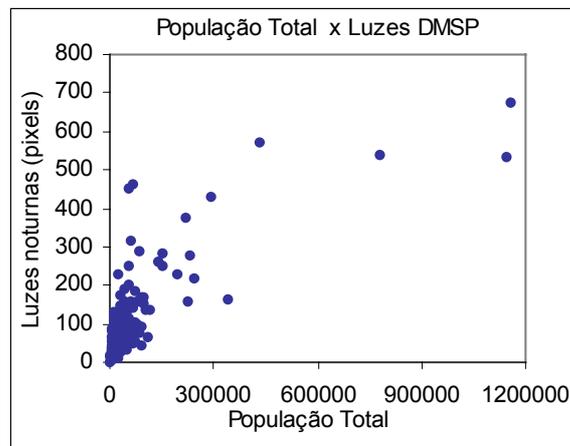


Figura 3.6 - População total e número de *pixels* de luzes DMSP por município com luz na Amazônia Legal.

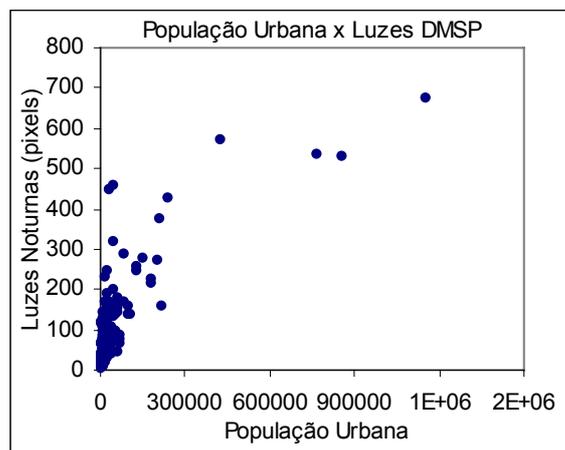


Figura 3.7 - População urbana e número de *pixels* de luzes DMSP por município com luz na Amazônia Legal.

Dois fatores contribuem para este resultado: (i) a grande variabilidade dos dados nos municípios de população urbana menores que 200.000 habitantes (ou população total menor que 300.000); (ii) e pelo efeito de "saturação" do número de *pixels* DMSP para municípios de população urbana maior que 400.000 habitantes. O efeito da dispersão

dos dados se comprova quando apenas os municípios de população urbana menor que 200.000 habitantes são apresentados (Figura 3.8). Ressalta-se ainda que a relação linear neste caso torna-se praticamente inexistente.

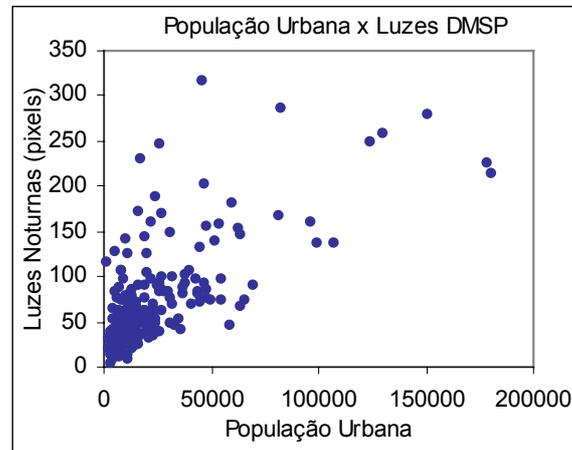


Figura 3.8 - População urbana e número de *pixel* de luzes DMSP para os municípios com menos de 200.000 habitantes.

Desta análise geral, partiu-se para uma investigação mais criteriosa restringindo-se a área de estudo ao estado do Pará. Dentre os 142 municípios do estado, 54 registraram focos de luzes DMSP. A relação entre população total e os *pixels* DMSP registrados pode ser observada na Figura 3.9. A mesma tendência geral de dispersão da população em relação às luzes DMSP encontrada para a Amazônia Legal foi encontrada ao se analisar o estado do Pará. Observado também para a população urbana (Figura 3.10).

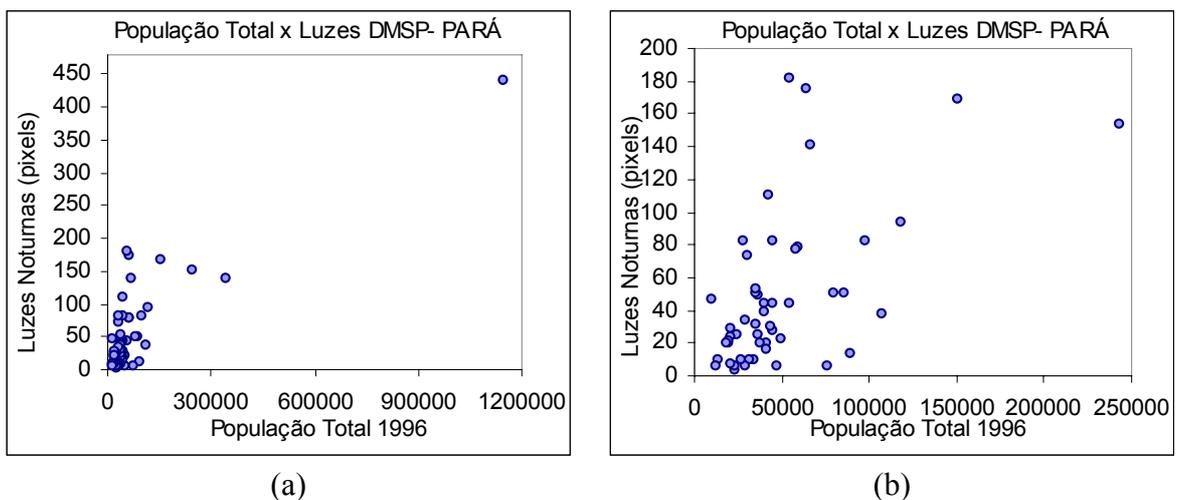


Figura 3.9 - População total e número de *pixels* DMSP por município no Pará: (a) para todos os municípios; (b) excluindo-se Belém.

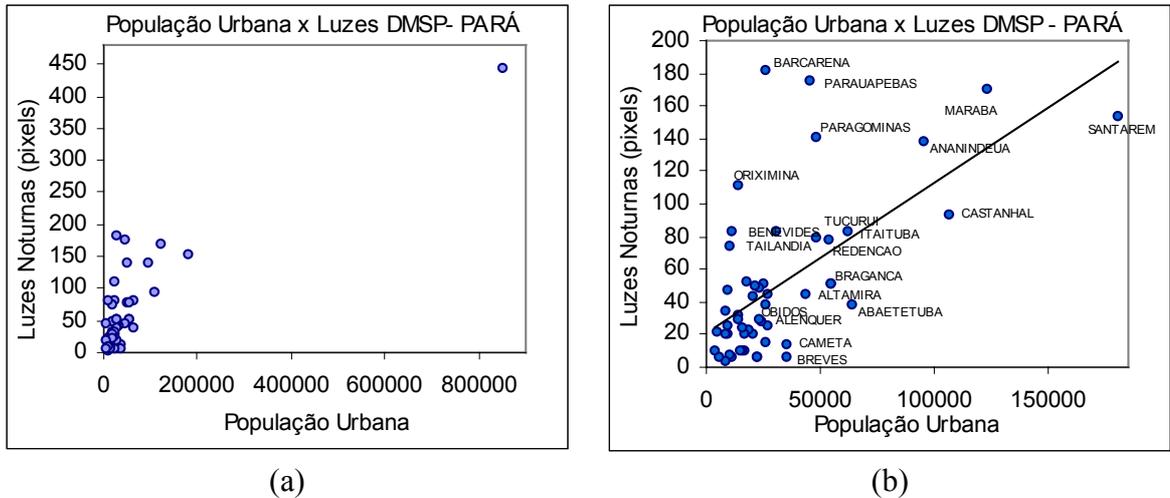


Figura 3.10- População urbana e número de *pixels* DMSP por município no Pará: (a) para todos os municípios; (b) excluindo-se Belém.

Contudo, ao se verificar a relação entre população urbana e luzes DMSP (Figura 3.10b) verificou-se dois grupos de pontos extremos de dispersão. No primeiro grupo encontraram-se os municípios onde o número de *pixels* DMSP é muito superior à população urbana. Neste caso incluem-se os municípios de Belém, Ananindeua e Bacarena, que apresentam áreas conurbadas com outros centros urbanos. Oriximiná, Paragominas e Parauapebas são áreas de mineração/garimpo intensamente iluminadas e praticamente sem população associada às luzes das minas. No segundo grupo de pontos extremos encontram-se municípios como Breves e Cametá onde há muito menos registro de luz que população. Estes municípios, observados em dados auxiliares (Mosaico do Brasil), persistiram como dúvidas. Talvez estes municípios sejam regiões de freqüente cobertura de nuvens e por isso não registraram luzes noturnas. Como nos dados auxiliares não foram observadas manchas urbanas significativas, pode ainda ser o caso onde a população urbana encontra-se dispersa em pequenos núcleos ao longo de rios. Como estes municípios apresentaram características incompatíveis com a relação que se pretendia analisar (presença de luz e de população) eles foram retirados do conjunto de dados. O resultado da relação linear entre as luzes DMSP e a população urbana do Pará excluindo-se estes casos “atípicos” é apresentado na Figura 3.11.

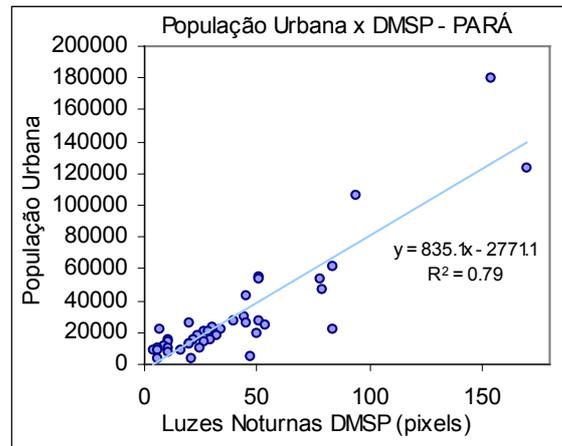


Figura 3.11 - População urbana e *pixels* DMSP por município com luzes DMSP no Pará excluindo-se casos “atípicos”.

Observa-se que a exclusão dos municípios “atípicos” melhorou a relação linear entre população urbana e as luzes da imagem DMSP com  $R^2 = 0,79$  (com número de observações,  $n = 41$ ). Este resultado é compatível com o obtido por Elvidge *et al.* (1997b), que encontrou  $R^2 = 0,85$  para uma relação log-log entre população e luzes noturnas DMSP, ao trabalhar em escala global analisando 21 países. Por sua vez, Sutton *et al.* (1997) ajustaram *pixels* de luzes noturnas DMSP para agrupamentos de áreas urbanas para todo os Estados Unidos, obtendo bons resultados tanto com o modelo linear ( $R^2=0.84$ ) quanto com o modelo exponencial ( $R^2=0.93$ ). Neste caso, as diferenças podem ser atribuídas às diferenças social e econômica significantes entre os assentamentos urbanos nos EUA e na Amazônia.

Tomando-se este modelo linear obtido entre população urbana e luzes DMSP para o Pará, procedeu-se o exercício de estimar as populações urbanas para outras localidades que registraram luzes DMSP e para os quais não havia informações de população a priori. Deste exercício obteve-se:

- Para a vila de Lourenço (AP), a regressão linear estimou uma população de 1.100 habitantes. Através de "testemunhas-chaves" da prefeitura de Calçoene (município que compreende a vila), obteve-se a informação de 1.203 residentes.
- Para a vila de Mosqueiro (PA), a regressão calculou inicialmente 72.388 habitantes. Porém a vila encontra-se às margens do rio Amazonas, o que faz com que o foco de luz seja superestimado através do efeito da margem de rios,

explicado anteriormente. Corrigindo-se este efeito através da redução do foco pela metade, a população urbana estimada foi de 34.808, compatível com o que foi informado pela prefeitura de Belém - 30.000 habitantes aproximadamente.

- Para a vila Ligação (PA), no limite entre os municípios de Dom Eliseu e Ulianópolis, a população estimada pela regressão foi de 11.100 habitantes. A informação obtida junto à prefeitura de Dom Eliseu foi de 6.355 habitantes para o ano de 1995.
- Para o município de Parauapebas, o total de luzes estimado corresponderia a uma população de 144.200 habitantes urbanos. Esta população estaria distribuída em 3 focos referentes a: (1) a área urbana efetivamente com 48.690 habitantes estimados; (2) a vila da Serra dos Carajás e à mina de ferro com 81.260 habitantes; (3) a mineração de ouro com 6.936 habitantes estimados. A população urbana na sede do município é de 45.649 habitantes na contagem populacional de 1996 (59.148 habitantes no censo de 2000), valor próximo ao estimado pela regressão. Contudo os valores de população para os outros dois focos são irrealistas. A companhia Vale do Rio Doce, que explora as minas em Parauapebas informou que a vila de Serra dos Carajás foi construída para suportar uma população de 7.000 habitantes. Esta vila corresponde a apenas uma parte da luz registrada em um grande foco na imagem DMSP que também engloba a mina de ferro - a maior e mais iluminada da região. O foco de luz da mineração de ouro não pode ser associado à população. Não há residência (casas/vilas) oficial da companhia nesta região, apenas a iluminação própria da mina.
- Para o município de Oriximiná foram identificados três focos de luz: um referente à sede do município, e outros dois para os quais não havia imagens TM-Landsat. Havia apenas imagens do radar JERS1 para se investigar a fonte de luz. Para a sede do município as luzes DMSP estimaram uma população urbana de 23.638 habitantes. Dados de contagem 1996 do IBGE registraram 23.540 habitantes na zona urbana (29.171 habitantes no censo de 2000). A prefeitura do município de Oriximiná informou que a Mineração Rio do Norte é a responsável pela vila de Porto de Trombetas. Esta vila situa-se às margens do rio Trombetas

e corresponde ao segundo foco de luz. Planejada para suportar até 6.500 habitantes, há atualmente 5.500 residentes na vila. O foco de luzes DMSP, através da regressão linear superestimou a população em 26.979 habitantes. Dois fatores podem explicar este resultado. A vila encontra-se às margens do rio Trombetas, o que remete ao efeito da margem de rios, descrito anteriormente. Por outro lado, a estrada que liga a mina à vila é intensamente iluminada, o que pode ter contribuído para ampliar o foco de luz da vila. O outro foco de luz, no município de Oriximiná, situa-se no interior da floresta. Corresponde à área de mineração da Companhia Rio do Norte que tem duas frentes de lavra: Saracai e Papagaio para exploração de bauxita, distantes 9 km uma da outra. Estas frentes são intensamente iluminadas por holofotes em função do trabalho contínuo de 24 hs por dia. O foco de luzes DMSP estimou uma população de 32.825 habitantes. Porém isso não reflete a realidade, uma vez que não há população residente, mas apenas iluminação da mina semelhante ao observado para as minas do município de Parauapebas.

- Outro foco de luz analisado, próximo à barragem de Tucuruí, refere-se à Vila de Tucuruí no município de Breu Branco. O foco de luzes DMSP estimou 16.123 habitantes através da regressão linear. A informação obtida junto à Eletronorte foi de aproximadamente 14.000 habitantes. Acrescenta-se também o fato de que próximo à vila são utilizadas lâmpadas de alta potência para iluminação do canteiro de obras o que podem contribuir para aumentar o foco de luzes.

Estes resultados indicaram que a regressão linear é uma aproximação útil para estimar a população. Foi possível utilizar um modelo obtido para um subconjunto de dados, no caso o estado do Pará e aplicá-lo para outros locais. Contudo, deve-se atentar para casos onde o padrão de ocupação é diferente do concêntrico, caso comum na região Amazônica com cidades às margens de rios, e para casos onde não há população residente.

Os resultados apresentados sugerem que a presença de focos de luzes para a região Amazônica, mais do que uma variável potencial para estimar população, é uma variável indicadora da atividade humana. Estas se traduzem na presença de vilas, povoados e atividades que demandam infra-estrutura, como as minas e canteiros de obras.

### 3.2.5 Consumo de energia elétrica e luzes DMSP

Informações de luzes DMSP foram avaliadas quanto a sua potencialidade para inferir o consumo de energia elétrica. Semelhante ao item anterior, esta análise restringe-se ao estado do Pará. Inicialmente verificou-se a relação entre população e o consumo de energia para cada município, excluindo-se do total do consumo de energia elétrica, o consumo do setor industrial (Figura 3.12). O consumo de energia (kWh) referente ao ano de 1999 foram cedidos pela Centrais Elétricas do Pará (CELPA). O gráfico mostra uma tendência linear entre o consumo de energia elétrica e a população residente nos municípios ( $R^2 = 0,91$ ). Se os valores de luzes DMSP e consumo de energia elétrica para Belém fossem incluídos, a relação linear teria um  $R^2 = 0,96$ . Este fato, adicionado aos resultados das relações lineares entre luzes DMSP e população urbana, motivou a exploração de relações entre as luzes DMSP e o consumo de energia elétrica dos municípios.

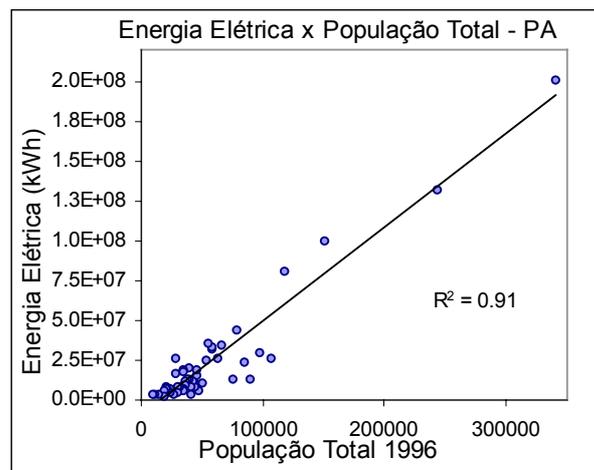


Figura 3.12 – Consumo de energia elétrica total (kWh) e população total, para os municípios do Pará, excluindo-se o consumo industrial e Belém.

O consumo de energia elétrica em iluminação pública e comercial apresentou correlação com os *pixels* de luzes DMSP (Figura 3.13), devido principalmente à dispersão nos dados. Fato observado principalmente para os municípios com área de luzes DMSP maiores que 100 *pixels*. Contudo, eliminando-se os mesmos municípios que foram considerados "atípicos" na relação entre população urbana e luzes DMSP, os dados de energia elétrica mostram-se correlacionados com os focos de luzes DMSP (Figura 3.14).

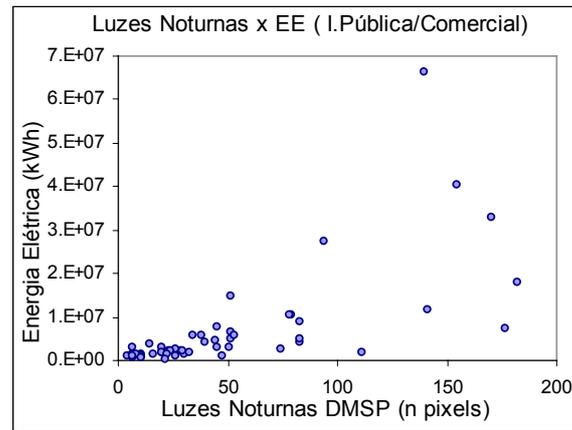


Figura 3.13 – Consumo de energia elétrica em iluminação pública e comercial (kWh) e número de *pixels* de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se Belém.

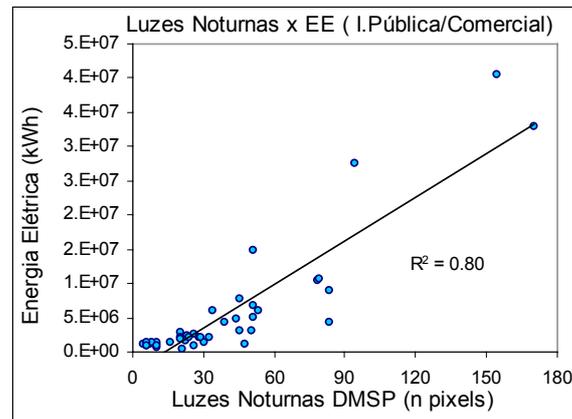


Figura 3.14 – Consumo de energia elétrica em iluminação pública e comercial (kWh) e número de *pixels* de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se casos “atípicos”.

Observou-se que foi possível inferir o consumo de energia elétrica a partir da detecção dos *pixels* de luz no mosaico DMSP, desde que algumas considerações iniciais sejam feitas como eliminar os casos atípicos. Do mesmo modo, a inferência do consumo de energia total torna-se viável como mostrado na Figura 3.15.

Estes resultados são comparáveis aos obtidos por Elvidge *et al.* (1997b), que encontraram um melhor ajuste ( $R^2 = 0.96$ ) com modelo logarítmico entre consumo de energia elétrica e número de *pixels* de luzes DMSP, em 21 países. Deve-se ressaltar a diferença de escala de trabalho, enquanto aquele autor utilizou dados agregados por país, neste trabalho foram computados valores para a escala mais detalhada possível, ou seja, municípios.

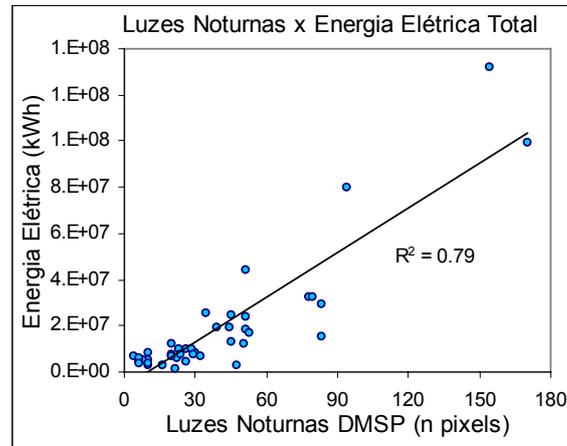


Figura 3.15 – Consumo de energia elétrica total (kWh) e número de *pixels* de luzes DMSP para os municípios do Pará, excluindo-se casos “atípicos”.

### 3.3 Considerações do Capítulo

O mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP analisado mostrou-se eficiente para detectar atividade humana na região Amazônica. Deve-se ter em mente que o mosaico DMSP-1999 é resultante de apenas 16 imagens, adquiridas no mês de setembro de 1999 época de alta incidência de queimadas na região. Os dados de sensoriamento remoto de resolução espacial mais detalhada que o mosaico DMSP confirmaram os focos de luzes noturnas como indício de atividades humanas. Incluem-se como atividade humana as localidades com infra-estrutura urbana, ou mesmo aquelas que demandam iluminação, tais como, garimpo ou construções civis. Nenhum foco foi associado a luzes efêmeras, como queimadas. Este resultado também foi devido à escolha de um limiar de percentagem de ocorrência de luzes (30%) adaptado ao mosaico disponível e à região para a qual foi analisado.

A relação linear entre as áreas de manchas urbanas delineadas a partir da banda TM3 - Landsat e as obtidas pelas áreas das luzes noturnas DMSP possibilitará estudos futuros de evolução de áreas urbanizadas. Deve-se ter em conta que municípios conurbados são detectados em um único foco. Isto sugere o uso de uma unidade de análise referente à área iluminada, independente de divisão política municipal. O acesso à imagem de radiância das luzes noturnas, e não apenas da percentagem de ocorrência em relação aos

dias livre de nuvem e de resolução *fine* (500 m), propiciaria estudos de densidade de ocupação urbana para as metrópoles semelhantes ao apresentado por Sutton (1997).

Algumas vilas, distritos e sedes de municípios tiveram suas posições geográficas redefinidas em função dos focos de luzes noturnas, o que foi validado pelas imagens de alta resolução espacial. Os dados auxiliares, imagens TM-Landsat e JERS1, e limites políticos do Mosaico do Brasil, foram essenciais para a confirmação dos focos de luzes noturnas. Sem esta validação não se justificaria a retirada dos municípios que apresentaram área de luzes noturnas muito acima ou abaixo do esperado em relação à população urbana dos mesmos. As relações lineares entre população urbana e área de luzes noturnas para o Pará talvez não fossem obtidas. Ou seja, luzes noturnas DMSP e população urbana poderão estar correlacionadas desde que algumas limitações sejam consideradas. A ocorrência de luzes noturnas pode não implicar em população residente, e a detecção de luzes pode ser prejudicada por intensa cobertura de nuvens ou fumaça de queimadas.

A mesma ponderação e retirada de eventos atípicos do conjunto amostral foi necessária para melhorar o ajuste da regressão linear entre área de luzes noturnas DMSP e consumo de energia elétrica. Os resultados obtidos sugerem o uso do mosaico de luzes noturnas como referência do consumo de energia elétrica. Poderia-se propor um acompanhamento do consumo de energia semelhante à análise feita para a região metropolitana de São Paulo, durante o período de racionamento de energia em 2001 (Carvalho, 2001). Para estes estudos recomenda-se a comparação de imagens de luzes estáveis, livre de nuvens, de passagem única, ao invés de mosaico. Isto evitaria o efeito da homogeneização intrínseco à geração do mosaico. Modelos que simulam a evolução dos padrões espaciais de atividades sócio-econômicas, como o descrito para a China (Plutzer *et al.*, 2000), poderiam ser implementados para a região Amazônica, tendo-se o mosaico DMSP como referência de padrão de áreas urbanas e demanda energética.

Os resultados da primeira análise de imagem de luzes noturnas DMSP mostraram o potencial para caracterizar a região Amazônica em escala global quanto à presença de atividade humana, localização de assentamentos urbanos, definição de manchas urbanas, estimativa de população urbana e consumo de energia elétrica. Ao mesmo tempo, novas questões advêm deste estudo. A primeira delas refere-se à qualidade da

imagem mosaico. Um mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP que considerasse um período maior e conseqüentemente um número maior de imagens caracterizaria melhor a região? Seria possível utilizar as informações do mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP para representar a distribuição da população urbana? Os capítulos que seguem buscam respostas a estas questões.

## CAPÍTULO 4

### PRODUÇÃO DO MOSAICO DE IMAGENS DE LUZES NOTURNAS

#### DMSP/OLS-2002 PARA ESTUDOS DEMOGRÁFICOS

Resultados promissores foram obtidos para o mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP/OLS, referente ao ano de 1999, quanto à presença e atividade humana na Amazônia Brasileira. Todos os focos de luzes foram associados a atividades humanas, incluindo assentamentos urbanos, minerações, entre outras. Dos 749 municípios da região, 248 tiveram suas sedes detectadas. Adicionalmente, foram observadas relações estatísticas lineares entre a extensão dos focos de luzes estáveis e a área dos limites urbanos, o total de população urbana e o consumo de energia elétrica. Um mosaico recente de luzes estáveis permitiria acompanhar a evolução temporal dos processos de ocupação da região Amazônica, especialmente se este mosaico incluísse uma série temporal de imagens maior que a do mosaico anterior, que compreendia apenas 16 dias do mês de setembro de 1999.

Outra aplicação para as imagens de luzes noturnas DMSP/OLS é a detecção de focos de queimada (Elvidge *et al.*, 2001b). Para esta aplicação, o mosaico de luzes estáveis é utilizado para remoção dos focos que não podem ser atribuídos às queimadas, realçando assim, as luzes efêmeras de interesse no monitoramento de queimadas em áreas florestais.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) operacionalizou um sistema baseado nas técnicas de geoprocessamento e previsão meteorológica, para monitoramento e avaliação de risco da ocorrência de incêndios florestais denominado Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal (PROARCO) (IBAMA, 2002). Neste sistema, o uso das imagens DMSP/OLS é considerado uma fonte adicional de dados complementar aos obtidos através dos satélites *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) e *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Sua utilização depende da existência

de uma imagem de luzes estáveis atualizada para a correta detecção dos focos de queimada.

Assim sendo, a geração de uma imagem DMSP/OLS mais recente resultante do mosaico de luzes noturnas, auxiliaria o IBAMA no programa de detecção de queimadas e permitiria continuidade aos estudos dos assentamentos humanos na Amazônia.

Este capítulo descreve os procedimentos desenvolvidos para elaboração do mosaico de imagens de luzes estáveis a partir de imagens noturnas do sistema DMSP/OLS para o período de janeiro a junho de 2002. Além do procedimento desenvolvido por Elvidge *et al.* (1997a), outras metodologias para gerar o mosaico são propostas, implementadas e avaliadas.

#### **4.1 Materiais e métodos para gerar o mosaico de imagens DMSP-2002**

Para gerar o mosaico de luzes estáveis foi utilizado um conjunto de 61 imagens DMSP/OLS, referentes a dias de lua nova dos meses de janeiro a junho de 2002. As imagens do satélite DMSP/F15 foram recebidas pela *Air Force Weather Agency* (AFWA) e registradas em arquivos pelo *National Geophysical Data Center's Solar Terrestrial Physics Division* (NGDC/STP). Esta base de dados foi disponibilizada ao IBAMA que realizou a primeira fase do processamento. Nesta primeira fase, as rotinas de geo-localização e detecção de luzes desenvolvidas pelo NGDC para geração de produtos de fogo (Elvidge *et al.*, 2000), foram aplicadas sobre as bandas nas faixas do visível (VNIR - *Visible Near Infrared*) e infravermelho termal (TIR - *Thermal Infrared*). As fontes emissoras e as nuvens foram identificadas de modo que, os *pixels* contendo fontes emissoras de VNIR foram geo-localizados e identificados na grade de referência. Uma grade/imagem foi gerada para cada órbita. Estas imagens contendo informação quanto à presença de luz, nuvem e *glare* (brilho) para cada órbita (denominadas imagens *flag*), foram então fornecidas para este trabalho. Os valores digitais (ND) utilizados para quantificar a informação presente nos *pixels* (células) de cada imagem *flag* são apresentados na Tabela 4.2. O IBAMA teve acesso às imagens e executou esta primeira fase fornecendo ao INPE as imagens com os *pixels* de luz e nuvens detectados e com o georreferenciamento adequado.

Dados auxiliares foram utilizados para avaliar as imagens resultantes do mosaico temporal. Considerando-se que luzes estáveis estão associadas às manchas urbanas, pontos com as coordenadas geográficas das sedes de municípios divulgadas pelo IBGE, foram sobrepostos às imagens como dados de referência. Imagens de sensoriamento remoto, disponíveis na base de dados do Mosaico do Brasil (MCT, 2003), proporcionaram informação sobre a cobertura do solo para regiões cuja classificação era duvidosa.

TABELA 4.2 - Níveis digitais (*flags*) das imagens DMSP/OLS.

| <i>Flag (N.D.)</i> | <i>Evento</i>       |
|--------------------|---------------------|
| 0                  | Sem Nuvem e Sem Luz |
| 1                  | Nuvem               |
| 2                  | Luz                 |
| 3                  | Nuvem e Luz         |
| 4                  | <i>Glare</i>        |
| 5                  | Nuvem               |
| 255                | <i>Bad Value</i>    |

#### 4.1.1 Procedimentos metodológicos

No procedimento padrão, após a detecção dos *pixels* de luz e nuvem e o georreferenciamento das imagens, segue-se a contagem da ocorrência de luz livre de nuvem em cada célula do conjunto de imagens *flag* (Elvidge *et al.*, 1997a). Este valor é dividido pelo número total de observações livres de nuvens e multiplicado por 100. Obtém-se assim, a percentagem de VNIR que foi detectada em cada célula da grade baseando-se somente nas observações OLS livres de nuvens. Este procedimento padrão foi implementado<sup>4</sup> em duas etapas: (i) contagem dos dias livres de nuvem e contagem das ocorrências de luz para um determinado *pixel*, e (ii) cálculo da percentagem dos dias sem nuvens para o qual registrou-se a ocorrência de luzes noturnas. Como resultado da primeira etapa obtiveram-se duas imagens: “Imagem Sem Nuvem” e “Imagem Luz”. O valor de cada *pixel* na primeira imagem corresponde ao total de dias sem ocorrência de nuvens na série temporal (i.e., contagem dos *flags* 0 e 2), enquanto na segunda imagem, corresponde ao total de dias em que se registrou alguma luz (contagem do *flag* 2).

<sup>4</sup> Todos os procedimentos descritos neste capítulo foram traduzidos em rotinas implementadas em IDL (versão 5.5 Win32) e encontram-se disponíveis no Apêndice A.

Da segunda etapa, gera-se uma imagem percentagem de luzes estáveis denominada “Percentagem de Luzes”, através da operação de divisão *pixel a pixel* da “Imagem Luz” pela “Imagem Sem Nuvem” e posterior multiplicação por 100, dado por:

$$IPL(i, j) = \left( \frac{IL(i, j)}{ISN(i, j)} \right) * 100 \quad (4.1)$$

onde  $IPL(i, j)$ ,  $IL(i, j)$  e  $ISN(i, j)$  representam, respectivamente, o valor da percentagem de luz, o total de dias em que se registrou luz e o total de dias sem ocorrência de nuvens no *pixel* (linha,coluna).

A inclusão de valores muito baixo de percentagens de luz gera uma imagem muito ruidosa, ou seja, uma imagem com grande quantidade de *pixels* detectados como luz estável devido à confusão entre *pixels* de luz estável e não-estável. Portanto, além da implementação do algoritmo sugerido pela literatura, acrescentou-se a possibilidade de dois novos parâmetros serem definidos na geração da imagem percentagem de luz: o limiar e o espaço amostral. O limiar é o valor a partir do qual os níveis digitais da imagem de saída serão considerados como sendo *pixel* de luz estável. Pode-se ainda restringir o espaço amostral a para geração da imagem, de modo que apenas os *pixels* que contenham um número mínimo de ocorrências de dias sem nuvens, definido pelo valor do espaço amostral, estejam presentes na imagem de percentagem. Por exemplo, especificando-se um limiar de 10 e um espaço amostral de 30, a imagem de saída conterá apenas os valores de percentagem maiores que 10 e somente para os *pixels* onde pelo menos 30 dias livres de nuvens foram registrados.

Adicionalmente, algumas opções de processamento foram implementadas buscando-se: (1) melhorar a detecção de luzes estáveis, ampliando-se o espaço amostral antes da geração da imagem percentagem; (2) sugerir alternativas à imagem percentagem para identificar luzes estáveis através de técnicas estatísticas, pela distribuição binomial ou a partir da análise das transições do que foi observado para cada *pixel* na série temporal.

Com o objetivo de aumentar o espaço amostral, ou seja, o número de dias em que foram registradas as ocorrências de luz, imagens de três dias consecutivos foram comparadas. Caso a segunda imagem da seqüência tivesse detectado alguma nuvem e na primeira e terceira imagens tivesse sido registrado luz, o registro da segunda imagem seria alterado

para luz. Em nenhuma outra situação de detecção o registro da segunda imagem seria alterado. O critério de alteração dos registros da segunda imagem, considerando-se uma série de três imagens de dias consecutivos é apresentado na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Critério de alteração dos valores de níveis digitais comparando-se a ocorrência de luz em três imagens consecutivas.

| 1° Imagem | 2° Imagem | 3° Imagem | 2° Imagem |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Luz       | Nuvem     | Luz       | Luz       |
| Nuvem     | Nuvem     | Luz       | Nuvem     |
| Luz       | Nuvem     | Nuvem     | Nuvem     |

Como resultado, um novo conjunto de imagens (*flags*) será criado anteriormente à contagem de ocorrência de luz e nuvem para a geração da imagem percentagem.

Uma alternativa para definir luzes estáveis a partir da série temporal de imagens foi proposta considerando a possibilidade de se estudar as características estatísticas das imagens. Neste estudo, o valor de nível digital de cada *pixel* é modelado através de uma distribuição binomial, com parâmetros N e p, definida por:

$$P(X) = \frac{N! p^x (1-p)^{N-x}}{x!(N-x)!} \quad (4.2)$$

tendo respectivamente como média e variância:

$$E(X) = Np \quad (4.3)$$

e

$$Var(X) = Np(1-p) \quad (4.4)$$

onde X, a variável aleatória, é o número de sucessos em N ensaios de Bernoulli independentes e todos com a mesma probabilidade de sucesso. Considerando, então, N como o número de imagens da série temporal (61 para este caso de estudo), p como a probabilidade de ocorrência de luz (dada pela razão entre a Imagem Luz e a Imagem Sem Nuvem) e X como sendo a contagem de luz, foram geradas mais três imagens: a imagem da média, a imagem do desvio padrão (raiz quadrada da variância) e uma imagem que leva em conta a seguinte relação linear entre a média e o desvio padrão da distribuição binomial:

$$E(X) > k\sqrt{\text{Var}(X)} \quad (4.5)$$

onde  $k$  é uma constante. A geração desta última imagem é uma maneira alternativa de se limiarizar a imagem Percentagem de Luz onde a limiarização é realizada através do modelo binomial.

Na tentativa de mapear os *pixels* representativos de luzes estáveis dada uma série temporal de imagens DMSP/OLS, realizou-se um estudo de identificação e quantificação de mudanças dos valores de *flags* (transição de estado) nas imagens desta série. No processo de quantificação de mudanças dos *flags* associou-se um peso (ponderação) para cada uma das possíveis transições, os quais foram adicionados de modo a gerar uma imagem de saída denominada “Imagem Transição”. Esta imagem final é indicadora das variações obtidas para todo o conjunto de imagens. Vale ressaltar que numa seqüência de  $M$  imagens são computadas  $M-1$  transições. A idéia da ponderação é penalizar fortemente os *pixels* que se apresentaram intermitentemente com luz e ressaltar os *pixels* de luz que não tiveram muitas transições de estado.

Este estudo consistiu de duas abordagens distintas. Na primeira, considerou-se apenas dois estados: um formado pelos *flags* Luz (2), e Nuvem e Luz (3), e o outro formado pelo agrupamento dos *flags* restantes. Na segunda abordagem levou-se em consideração três estados: o formado pelo *flag* Luz (2), o composto pelos *flags* Nuvem (1 e 5) e Nuvem e Luz (3) e pelo agrupamento dos *flags* restantes.

As imagens são inicialmente binarizadas. Para a primeira abordagem, atribuiu-se o valor 0 para os *flags* Sem Nuvem e Sem Luz (*flag* 0), Nuvem (*flags* 1 e 5), *Glare* (*flag* 4), e *Bad Value* (*flag* 255); e atribuiu-se o valor 1 para os *flags* Luz (*flag* 2) e Nuvem e Luz (*flag* 3). Os valores de ponderação cada uma das transições são apresentados na Tabela 4.4.

Para a segunda abordagem, ou seja, três estados de transição, os valores atribuídos a cada um dos três grupos de *flags* foram:

- 0 para os *flags*: Sem Luz (0), *Glare* (4), *Bad Value* (255);
- 1 para o *flag*: Luz (2);

- 2 para os *flags*: Nuvem (1 e 5) e Nuvem e Luz (3).

TABELA 4.4 – Critérios de atribuição de pesos considerando duas transições dos valores de níveis digitais (*flags*) de duas imagens consecutivas.

| Transição |           | Peso |
|-----------|-----------|------|
| 1º Imagem | 2º Imagem |      |
| 0         | 1         | 2    |
| 1         | 0         | -2   |
| 0         | 0         | -1   |
| 1         | 1         | 1    |

Para a segunda abordagem foram ainda consideradas duas ponderações diferentes para cada uma das transições: uma mais conservadora (Int\_L) e outra que realçasse as diferenças entre as transições (Int\_H). Na Tabela 4.5 são mostradas estas ponderações para cada uma das possíveis transições.

TABELA 4.5 – Critérios de atribuição de pesos considerando três transições dos valores de níveis digitais (*flags*) de duas imagens consecutivas.

| Transição |           | Peso  |       |
|-----------|-----------|-------|-------|
| 1º Imagem | 2º Imagem | Int_L | Int_H |
| 0         | 0         | -1    | -2    |
| 0         | 1         | 4     | 20    |
| 0         | 2         | -1    | -2    |
| 1         | 0         | -4    | -4    |
| 1         | 1         | 6     | 18    |
| 1         | 2         | -4    | -4    |
| 2         | 0         | 0     | 0     |
| 2         | 1         | 4     | 20    |
| 2         | 2         | -2    | -3    |

## 4.2 Imagens resultantes

A imagem que descreve a cobertura de nuvem e a imagem com o total de *pixels* identificados como luzes para o período considerado podem ser observadas na Figura 4.1. Obteve-se para o Brasil uma cobertura de nuvens mais intensa na região norte que a região sudeste-sul. Mesmo com esta limitação, os principais eixos das cidades e metrópoles são genericamente delineados na imagem de luz.

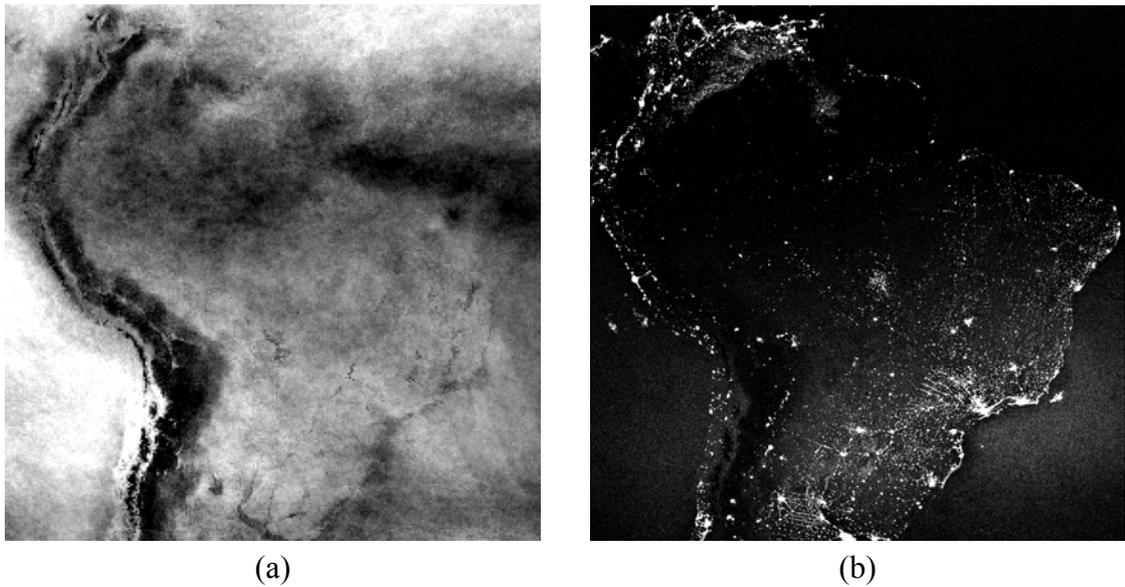


Figura 4.1 – (a) Imagem Sem Nuvem - contagem de dias sem nuvens; (b) Imagem Luz - contagem de dias onde se detectou luz, de janeiro a junho de 2002.

Como o objetivo era gerar um produto de luzes estáveis para estudos de população na região Amazônica, os resultados serão apresentados enfocando detalhes de duas regiões: a região metropolitana da cidade de Belém (PA), selecionada pela freqüente cobertura de nuvens e ocorrência de vários focos de luzes (Figura 4.2a e b) e os arredores da cidade de Sinop (MT), por ser uma região de ocorrência freqüente de queimadas, intensa atividade madeireira e de fronteira agrícola (Figura 4.2c e d).

Diferentes valores de limiar e espaço amostral foram testados na geração de imagem percentagem de luz. Incluindo-se todos os *pixels* que apresentaram alguma percentagem de ocorrência de luz obteve-se uma imagem muito ruidosa com muitos focos associados a efeitos de brilho de superfícies, inclusive de corpos d'água próximos à região de Belém (Figura 4.3a). Restringindo-se o limiar para apresentação dos valores a partir de 10% (Figura 4.3b), como apresentado por Elvidge *et al.* (1997a), elimina-se a maioria dos ruídos (*pixels* isolados), porém, ainda ocorrem valores de luzes sobre o oceano, o que é eliminado ao se considerar o limiar de 30%. Apesar de alguns centros urbanos também serem eliminados com o limiar de 30% (Figura 4.3d), este valor foi escolhido uma vez que todos os ruídos, ainda presentes no limiar de 20% (Figura 4.3c) foram eliminados. Resultados satisfatórios para limiar de 30% foram apresentados por (Amaral *et al.*, 2003).

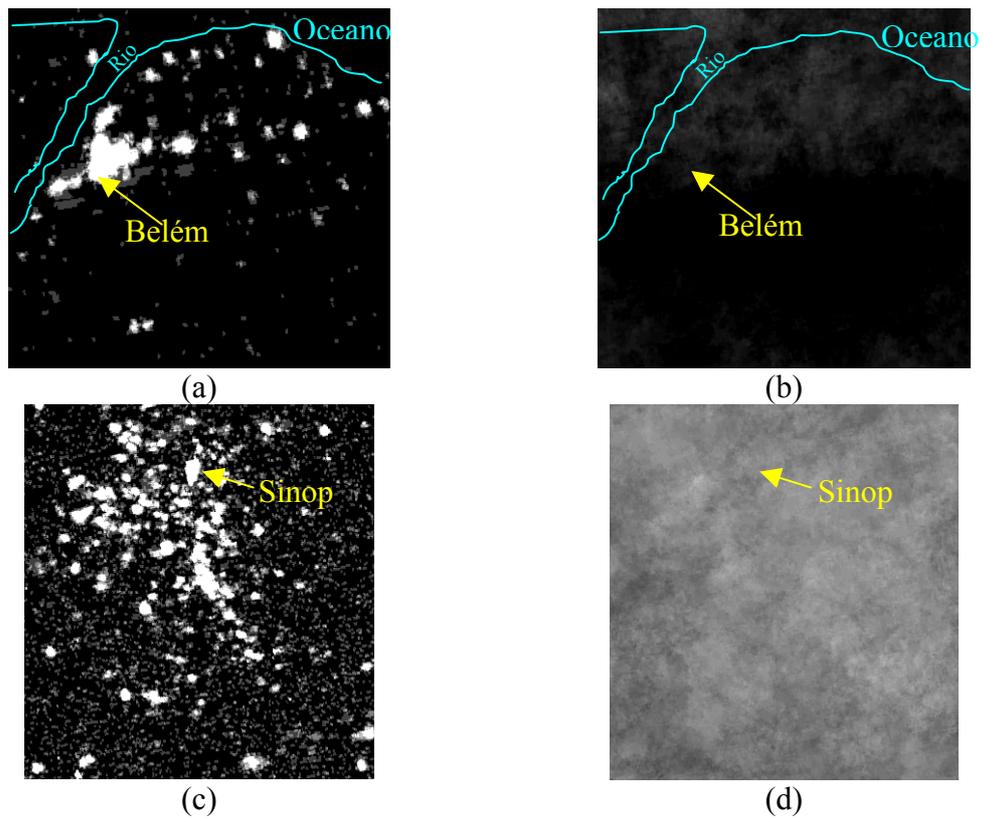


Figura 4.2 – Imagens percentagem de luz e contagem de dias sem cobertura de nuvens das regiões de Belém – PA (a e b) e Sinop - MT (c e d).

Reduzindo-se o espaço amostral para pelo menos 5 e 10 dias em que o *pixel* esteve livre de nuvens e considerando-se o limiar de 30%, observa-se uma redução do número de *pixels* detectados como luz estável. Esta redução é notada principalmente em regiões com intensa cobertura de nuvens como no caso da cidade de Belém. Portanto, com a restrição do espaço amostral tende-se a diminuir as áreas de luz estável, bem como eliminar *pixels* isolados detectados como luz ao se considerar todo o conjunto amostral. Este fato é ilustrado quando se comparam as Figuras 4.3d e 4.4.

Desta forma, a restrição do espaço amostral não pôde ser aplicada neste trabalho, uma vez que na região Amazônica a situação de cobertura de nuvens é freqüente. Esta rotina poderá ser útil para séries temporais maiores e/ou regiões com menor cobertura de nuvens.

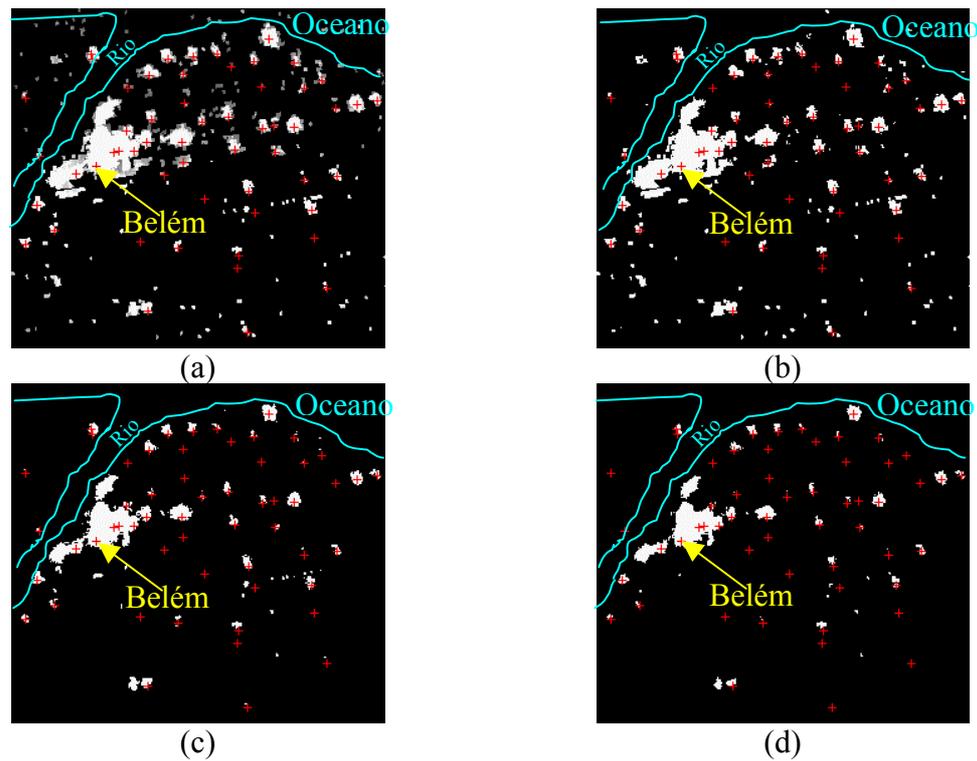


Figura 4.3 – Imagem Percentagem de Luz, com limiares de (a) 0, (b) 10, (c) 20 e (d) 30% para a região de Belém - PA.

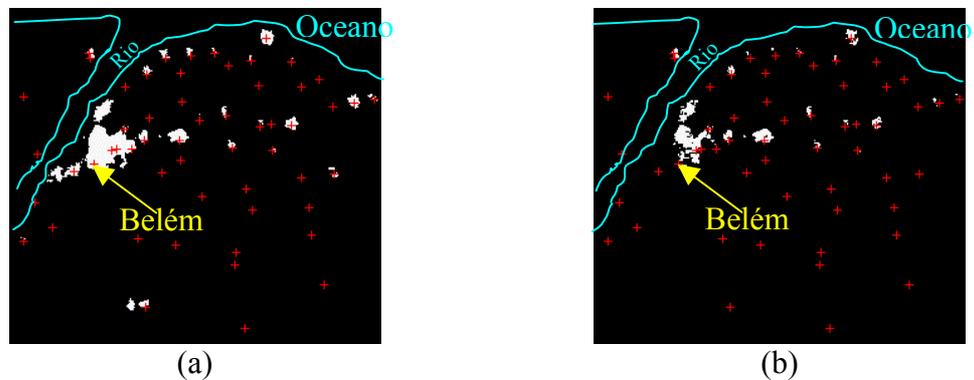


Figura 4.4 – Imagem Percentagem de Luz com espaço amostral de (a) 5 e (b) 10.

#### 4.2.1 Estudo da ocorrência de nuvens

Comparando-se visualmente os produtos gerados com e sem o procedimento para aumentar o conjunto de *pixels* válidos, restringindo-se o efeito da cobertura de nuvens, não foram observadas muitas diferenças entre as imagens. Esperava-se aumentar o potencial de detecção de pequenos centros em regiões de nuvens frequentes. Através da subtração das imagens (Figura 4.5), identifica-se que o ganho de informação concentrou-se nas regiões das bordas dos focos de luz. Não houve identificação de

novos centros urbanos, apenas expansão das bordas dos focos pré-existentes e acréscimo de valores isolados considerados ruídos na imagem resultante. Assim sendo, este procedimento não foi incluído para a elaboração do produto final de luzes noturnas estáveis.

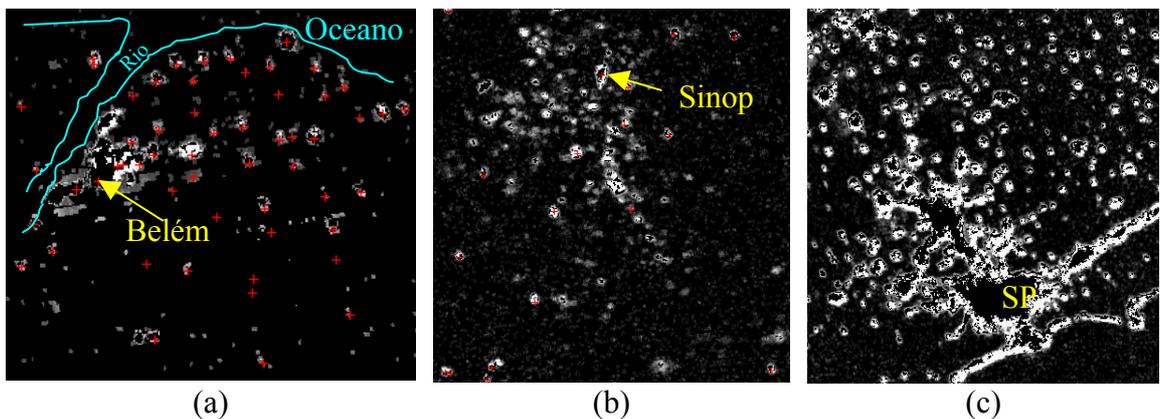


Figura 4.5 - Diferenças entre as imagens com e sem processamento para redução de nuvens em (a) Belém - PA, (b) Sinop - MT e (c) São Paulo - SP.

#### 4.2.2 Resultados da abordagem através da distribuição binomial

A imagem da média de ocorrência de luzes noturnas apresenta um aspecto bastante ruidoso (Figura 4.6a), sendo que mesmo na superfície do mar, há *pixels* registrados com valores de média entre 1 e 15. A imagem de desvio padrão é ainda mais ruidosa, porém, como ressalta as diferenças do conjunto de imagens, detecta as bordas dos focos de luzes noturnas mais intensos como as sedes de municípios com mais de 50.000 habitantes (Figura 4.6b).

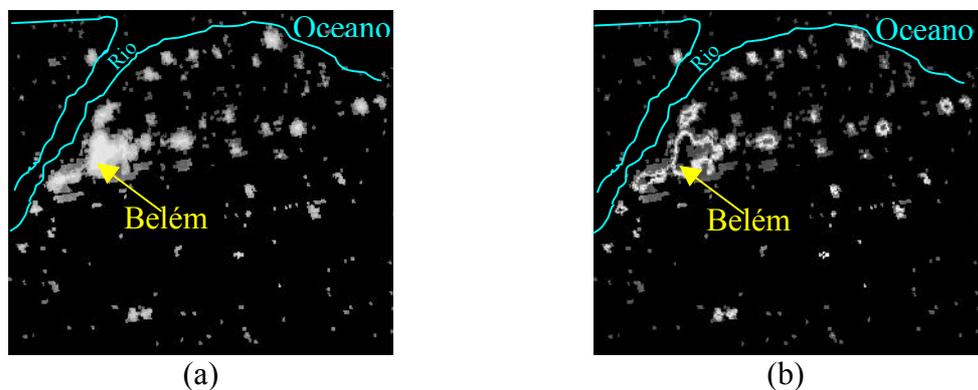


Figura 4.6 - Imagens de média (a) e desvio padrão (b) para Belém – PA.

A partir das imagens de média e variância, foram testados diferentes valores para a constante  $k$ , que relaciona linearmente a média e o desvio padrão ( $média > k * desvio$ ).

Apenas a partir de  $k$  maior que 3 os ruídos foram eliminados da imagem e com um  $k$  igual a 5, obtém-se uma imagem semelhante à imagem de percentagem de luz com o limiar de 30% (Figura 4.7).

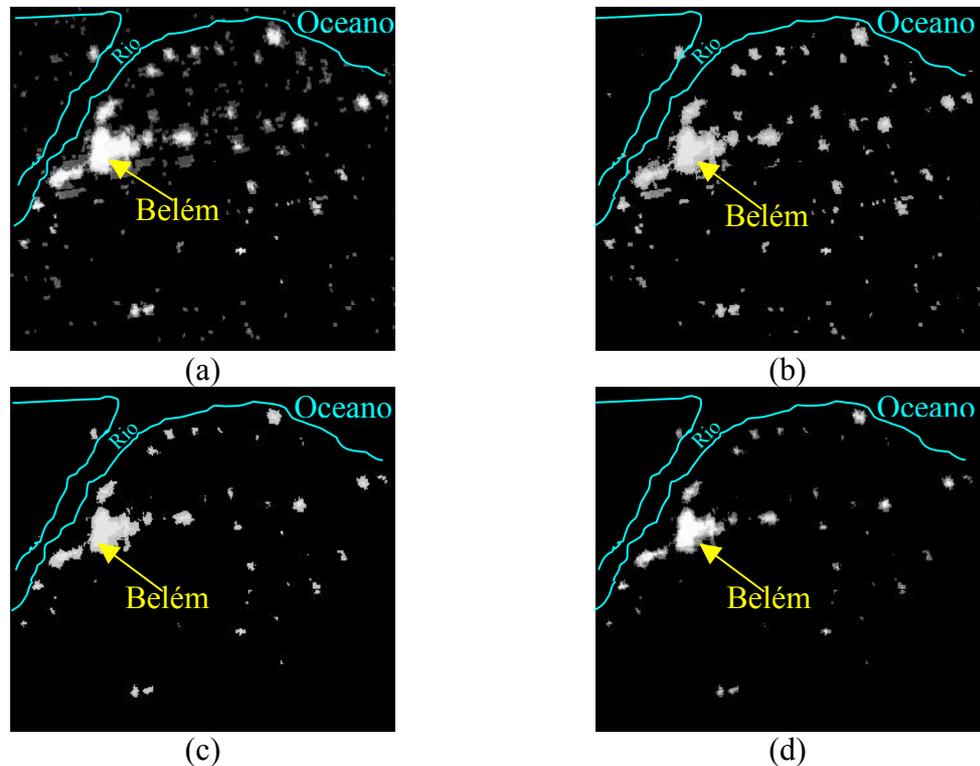


Figura 4.7 - Imagens com limiares de  $k = 1$ (a),  $k = 3$  (b)  $k = 5$  (c) e imagem percentagem de luz com limiar de 30% (d) para Belém – PA.

Não há distinção entre os focos detectados na imagem de limiar com  $k$  igual a 5 e na imagem percentagem de luz com limiar igual a 30% (Figura 4.7c e d, respectivamente). A única diferença foi encontrada nos valores digitais e conseqüentemente, nos seus histogramas. Os valores de nível digital na imagem de limiar  $k = 5$  refere-se aos números de dias nos quais as luzes noturnas foram registradas e por isso, seu histograma varia de 0 a 60. Obtém-se assim, uma imagem de menor contraste em relação à imagem de percentagem de luz com limiar igual a 30%. Como nesta os valores de nível digital variam de 0 a 100%, seu histograma indica um contraste maior. A definição de limiar baseada na média e variância binomial gerou resultados similares aos apresentados para a definição dos limiares sobre a imagem de percentagem de ocorrência de luz.

### 4.2.3 Estudo das transições

O primeiro estudo almejou realçar apenas as transições de um *pixel* não luz para a categoria luz. A imagem resultante (Figura 4.8a) capturou além das luzes estáveis o efeito da intensa cobertura de nuvens no norte e nordeste do Brasil, impossibilitando distinguir as luzes estáveis nestas regiões. Isto porque as transições para *pixel* com luz e nuvem foram contabilizadas.

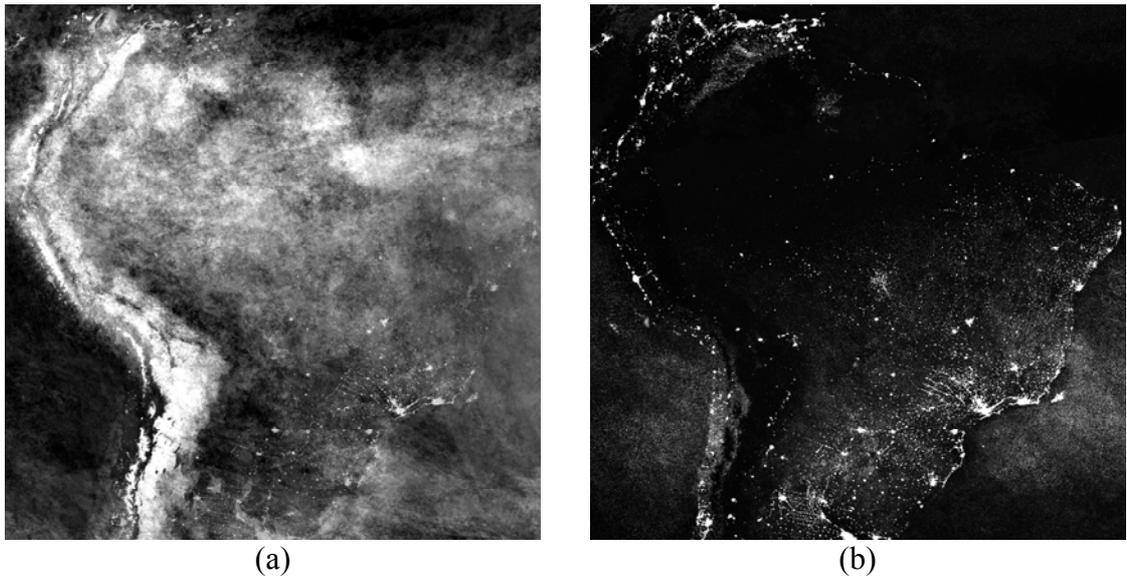


Figura 4.8 – Imagens resultantes das transições dos *pixels* (a) não luz/luz, e (b) luz/nuvem/outros.

Um segundo estudo foi realizado considerando também a transição para nuvens (Figura 4.8b), para o qual duas atribuições de peso foram experimentadas. Esta imagem é similar à Imagem Luz (Figura 4.1b) quanto à visualização de feições. Porém ao se analisar em detalhe, selecionando-se apenas os valores positivos no histograma, ou seja, a permanência ou alteração para luz, não se obtém resultados similares para regiões em situações de cobertura de nuvens distintas. Para a região de Belém (Figura 4.9a) muitos focos de luzes de interesse não foram realçados enquanto que para Sinop (Figura 4.9b), de menor cobertura de nuvens, muitos ruídos foram realçados na imagem.

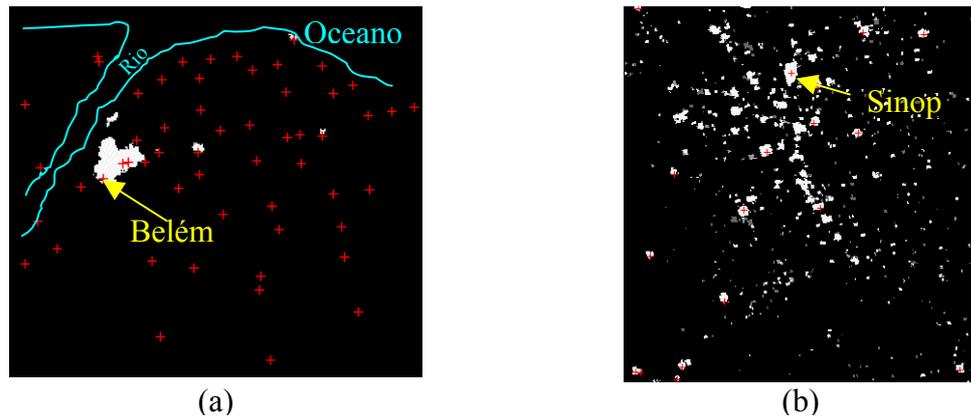


Figura 4.9 – Imagens Transição para regiões de (a) Belém - PA e (b) Sinop - MT.

Experimentando-se diferentes realces sobre os histogramas, a imagem resultante pode se aproximar da imagem Percentagem de Luz. Porém, os efeitos são diferenciados de acordo com a região e a condição de nuvem local. A atribuição dos pesos para cada transição dificulta a manipulação destes valores de histogramas, uma vez que o critério adotado baseou-se numa escala empírica para realçar a ocorrência de luzes. Este procedimento baseado nas transições seria eficiente para regiões mais homogêneas e com atribuições de pesos com critérios mais sofisticados.

Devido aos resultados apresentados, o procedimento de análise das transições não foi incorporado para a geração do produto final de luzes estáveis.

#### 4.2.4 Identificação de queimadas

Observando-se a posição das sedes de município em relação aos focos de luzes, verificou-se para a região de Sinop uma concentração anômala de luzes noturnas. Testes realizados utilizando-se valores rigorosos de limiares e espaço amostral continuaram evidenciando a ocorrência destas feições e eventualmente eliminando pequenas sedes de município (Figura 4.10). Estes resultados comprovam que a região esteve livre de nuvens em pelo menos metade dos dias avaliados e que luzes noturnas foram registradas em pelo menos 30% destes registros. Utilizando-se de imagens TM-Landsat do Mosaico do Brasil, verificou-se que esta é uma região originalmente de floresta nos limites da fronteira agrícola de soja do Mato Grosso.

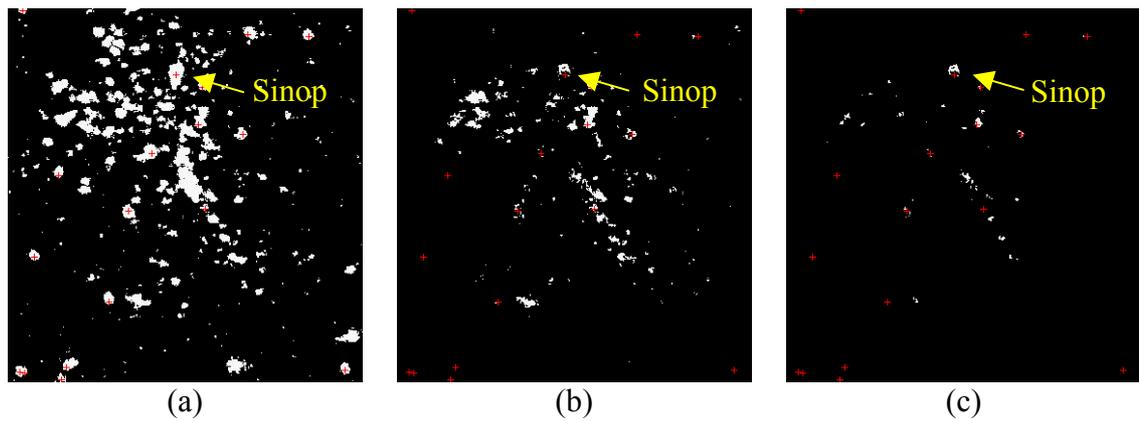


Figura 4.10 - Imagem Percentagem de Luz para a região de Sinop, com limiares e espaço amostral de (a) 10, 10 (b) 10, 30 (c) 30, 30.

Avaliando-se a ocorrência dos focos de queimada acumulados para o período fornecida pelo PROARCO- IBAMA, observou-se um grande número de focos de maio a junho de 2002. Apesar de não se tratar da época tradicional de queimada houve uma intensa atividade no período (Figura 4.11), com um total de 11.047 focos registrados para o estado de Mato Grosso.

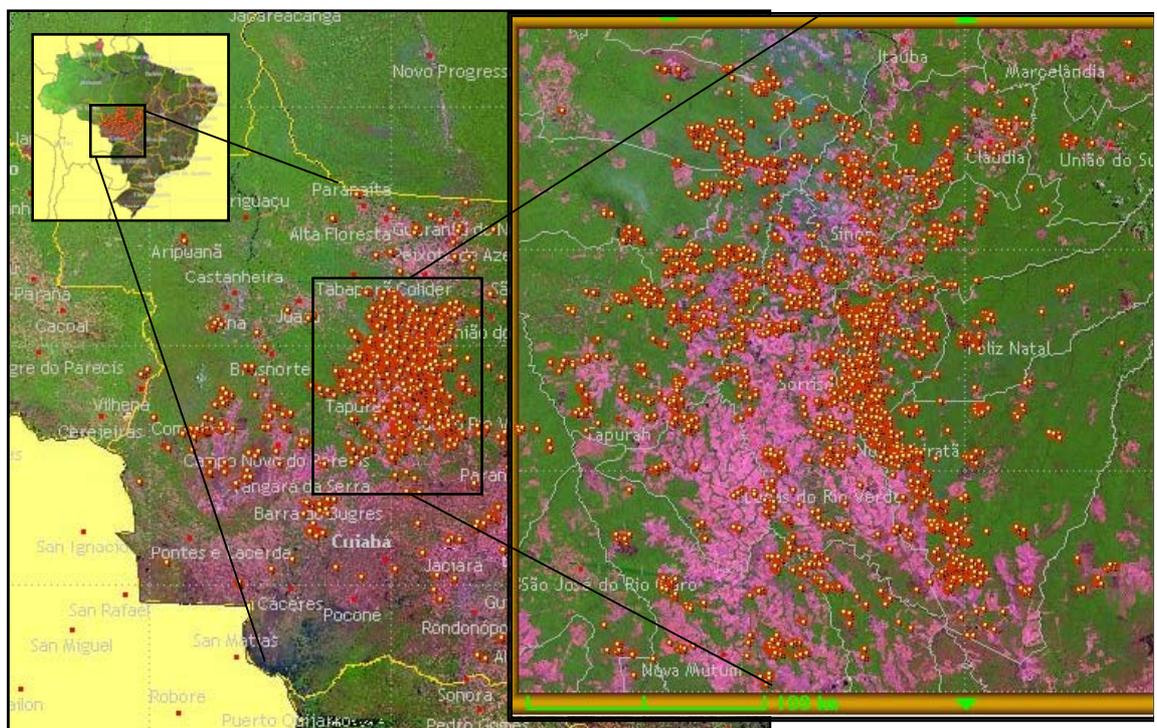


Figura 4.11 – Focos de queimada acumulados para os meses de maio e junho de 2002, na região de Sinop - MT.

Fonte: modificado a partir de PROARCO (2003).

Esta observação foi comprovada ao se gerar o mosaico de imagens de luzes estáveis considerando apenas os meses de janeiro a abril de 2002, onde feições similares não foram observadas. Na impossibilidade destas áreas de queimada serem excluídas automaticamente do mosaico dos seis meses, o produto final de luzes noturnas foi gerado eliminando-se estas feições através de edição semi-automática. Nesta edição foram aplicadas técnicas de processamento digital de imagens associadas à interpretação visual de imagens e edição manual

Um detalhe do mosaico com eliminação dos focos de queimada pode ser observado na Figura 4.12. Os focos de luzes que não estão associados a nenhuma sede de município na Figura 4.12b referem-se a núcleos com infra-estrutura urbana, observáveis nas imagens TM-Landsat.

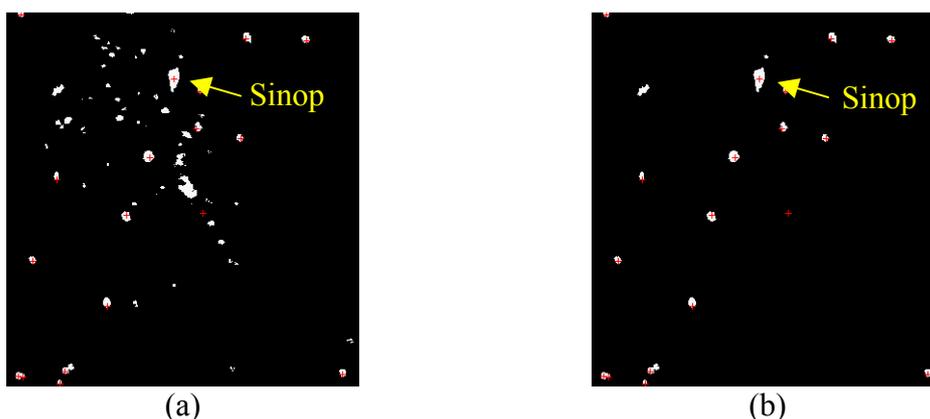


Figura 4.12 – Imagem Percentagem de Luz para Sinop: (a) limiar = 30, espaço = 0 e (b) após edição de queimadas.

#### 4.2.5 O produto mosaico de luzes noturnas estáveis

O produto final, ou seja, o mosaico de imagens de luzes estáveis DMSP/OLS para o período de janeiro a junho de 2002 encontra-se disponível em <[www.dpi.inpe.br/DMSP2002](http://www.dpi.inpe.br/DMSP2002)>. Cada *pixel* da imagem resultante corresponde à percentagem de dias em que se detectou luz em relação ao número de dias para os quais não se registrou ocorrência de nuvens. Valores inferiores a 30% foram eliminados da imagem por apresentarem um compromisso satisfatório entre a presença de luzes associadas a feições de interesse, tais como sedes de município, e ausência de *pixels* solitários (ruídos) não associáveis a atividades humanas.

Os *pixels* referentes às queimadas foram eliminados através de edição semi-automática no produto final. Este procedimento é essencial para que o IBAMA possa utilizar o mosaico de luzes estáveis DMSP/OLS no monitoramento de queimadas identificando apenas os eventos efêmeros de interesse, ou seja, as queimadas. A remoção dos *pixels* referentes às queimadas também é fundamental para se viabilizar o uso do mosaico DMSP em estudos de distribuição populacional.

As rotinas desenvolvidas constituem outro produto, permitindo a elaboração de novos mosaicos para novas seqüências de imagens. Desta forma, com as imagens de janeiro a junho de 2003 correspondentes ao período de lua nova, também foi gerado o mosaico de luzes noturnas DMSP para 2003 seguindo-se o procedimento descrito para 2002.

Uma vez que os novos mosaicos DMSP para 2002 e 2003 foram gerados, inicia-se a segunda parte deste capítulo. Apresenta-se a seguir a análise dos mosaicos quanto à utilidade para se estimar população urbana na Amazônia Legal.

### **4.3 Relações entre o mosaico de imagens DMSP-2002 e a população urbana**

A partir dos focos de luzes noturnas, identificados no mosaico de imagens DMSP-2002 como luzes estáveis, ou seja, valores de nível digital maiores que 30 (ou maiores que 30% de ocorrência de dias onde se registrou luz noturna em relação ao conjunto de imagens livres de nuvem utilizado), definiu-se uma área de influência (*buffer*). Esta área será aqui denominada unidade de análise DMSP (UaDMSP), que corresponde à expansão em 4 km da margem dos focos de luzes noturnas. Desta forma, pretendeu-se minimizar possíveis erros de posicionamento entre os mosaicos DMSP de 1995, 1999, 2002 e 2003 e a posição geográfica dos distritos. A Figura 4.13 apresenta um resumo das atividades realizadas a partir do mosaico DMSP-2002 quanto às relações entre luzes noturnas e estimativas de população urbana para a região Amazônica.

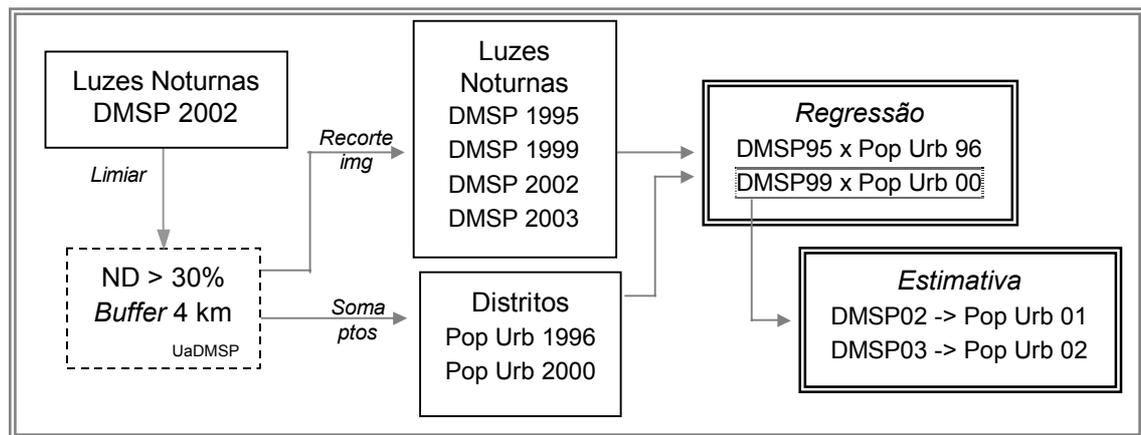


Figura 4.13 – Resumo dos procedimentos para o estudo das relações entre os mosaicos de imagens de luzes noturnas DMSP e dados de população urbana.

Inicialmente, ao se comparar a posição geográfica e os valores de população urbana dos distritos no Censo 2000 com as unidades de análise DMSP que tiveram registros de luzes noturnas no mosaico de 2002 foi possível observar que:

- 100% dos distritos com mais de 20.000 habitantes urbanos (112 distritos) estiveram incluídos em uma unidade de análise DMSP;
- Dos 110 distritos com população entre 10.000 e menos que 20.000 habitantes, apenas 5 deles não estiveram inseridos em uma unidade de análise DMSP. Arame no Maranhão, de população urbana igual a 11.461 habitantes, Breu Branco, no Pará, de população urbana igual a 15.952 habitantes e PioXII também no Maranhão, de população urbana igual a 12.944 habitantes. Estes municípios, ao serem verificados em imagens do Mosaico do Brasil, apresentaram erro nas coordenadas geográficas divulgadas pelo IBGE. Este fato foi confirmado ao se verificar as respectivas cartas topográficas na escala 1:250.000. No município de Terra Santa no Pará de população urbana igual a 10.965 habitantes, a energia é proveniente de termelétrica e pode ter fornecimento intermitente, o que explicaria não ter sido detectada. No município de Viseu, no Pará de população urbana igual a 11.558 habitantes, apesar do fornecimento ser através de hidrelétrica, os dados de energia de 1999 indicaram baixo consumo de energia em iluminação pública (74,12 kWh) quando comparado a outro município do Pará, de população urbana similar. Santa Maria do Pará, por exemplo, tem população urbana igual a 11.709 e consumo de 909,07 kWh de energia elétrica em iluminação pública;

- Dos 169 distritos com população entre 5.000 e menos que 10.000 habitantes, 82% dos distritos estiveram inseridos em uma unidade de análise DMSP (138 distritos). Como a maioria destes distritos encontram-se em região de intensa cobertura de nuvens (Maranhão e nordeste do Pará) esta classe de população urbana define um limar inferior para detecção de distritos na região Amazônica através de mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP;
- E finalmente, dos 613 distritos com menos que 5.000 habitantes na zona urbana, ainda se obteve 35% deles inseridos em uma unidade de análise DMSP (219 distritos).

Esta análise difere da apresentada anteriormente para o mosaico DMSP de 1999 principalmente quanto à metodologia para computar os valores de *pixels* de luzes noturnas. Na análise do mosaico de 1999 foi contabilizada a somatória dos *pixels* de luzes noturnas considerando o limite do município, enquanto que para 2002, cada foco de luz noturna serviu como unidade de análise, comparando-se à ocorrência e população do(s) distrito(s) contido(s) na zona de influência. Este detalhe metodológico reduziu a variabilidade dos dados, ou seja, eliminou unidades de análise para as quais não se tinham distritos associados. Desta forma não foi necessário eliminar ocorrências anômalas, como feito para a análise do mosaico de luzes noturnas para 1999.

Numa segunda etapa, considerando-se as unidades de análise DMSP foi possível contabilizar os *pixels* de luzes DMSP registrados em 1995, 1999 e 2002, classificados com nível digital maior que 30 (ou 30%). O objetivo foi verificar se havia algum padrão no registro das luzes noturnas que pudesse ser associado à evolução da população urbana para o mesmo período. A análise exclusiva dos registros de luzes noturnas, esquematizada na Figura 4.14, indica valores crescentes de luzes noturnas de 1995 a 2002. Porém, independentemente da avaliação da população urbana para as unidades de análise no período considerado, a imagem de 2002 é resultado de uma série maior de passagens, o que por si, explicaria o acréscimo dos *pixels* de luzes noturnas.

Foram definidas 516 unidades de análise - polígonos referentes a zonas de 4 km a partir dos limites das áreas de luzes noturnas classificadas como luzes estáveis no mosaico DMSP-2002. No mosaico DMSP-1999, foram registradas 280 unidades de análise com

luzes. Destas, 248 corresponderam a distritos com população urbana associada conforme o censo de 2000. As demais regiões correspondem a localidades com luzes noturnas e não se configuram distritos, podendo ser vilas não contabilizadas pelo censo, áreas iluminadas sem registro de população residente como observado anteriormente nas áreas de mineração ou outras atividades humanas. No mosaico DMSP-1995 foram registradas 243 unidades de análise com luzes e 226 correspondentes a distritos com população urbana associada, conforme a contagem populacional de 1996.

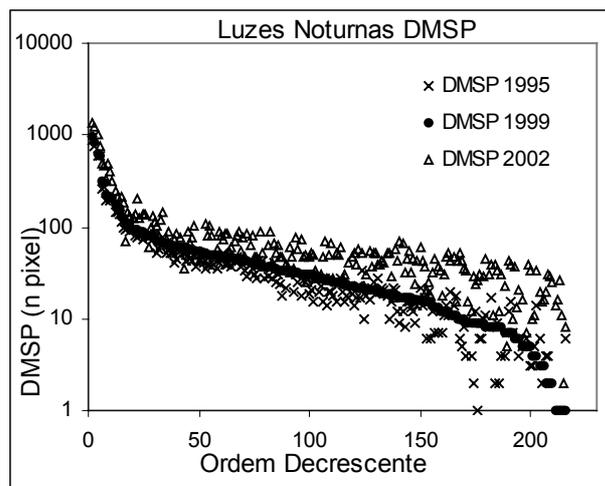


Figura 4.14 – Registro de *pixels* de luzes noturnas nas imagens mosaico DMSP referentes a 1995, 1999 e 2002.

A partir das unidades de análise DMSP (UaDMSP), calculou-se a somatória da população urbana 1996 e 2000 para os distritos inseridos em cada UaDMSP. Similarmente, o total de *pixels* de luzes estáveis para cada unidade de análise foi calculado para os mosaicos DMSP-1995 e DMSP-1999. Na Figura 4.15 pode-se observar as relações entre a população urbana e número de *pixels* de luzes noturnas para cada UaDMSP nas duas datas consideradas. As unidades de análise contendo as principais metrópoles da região quais seguem Manaus, Belém, São Luís e Cuiabá, foram retirados do conjunto de dados na Figura 4.15b e 4.15d. Como a unidade de análise é resultante da expansão dos focos de luzes noturnas no mosaico DMSP-2002, a população urbana não se refere apenas à região metropolitana mas a uma área maior. Este fato explica os valores de população maiores para Belém que Manaus. A unidade de Belém incluiu o distrito de Mosqueiro ao norte, Castanhal a oeste e Murucupi ao sul, totalizando uma área de 2.828 km<sup>2</sup>. Por outro lado, Manaus incorporou apenas Iranduba, resultando em numa área de 1.532 km<sup>2</sup>.

De modo geral foram encontrados altos valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) sugerindo relação linear entre luzes noturnas e população urbana dos distritos. Sem as unidades contendo as principais capitais (Belém, Manaus, São Luís e Cuiabá), observou-se maior dispersão na relação linear. Mesmo assim, foram encontrados valores de  $R^2$  equivalentes aos apresentados pela literatura ( $R^2 \geq 0,82$ ).

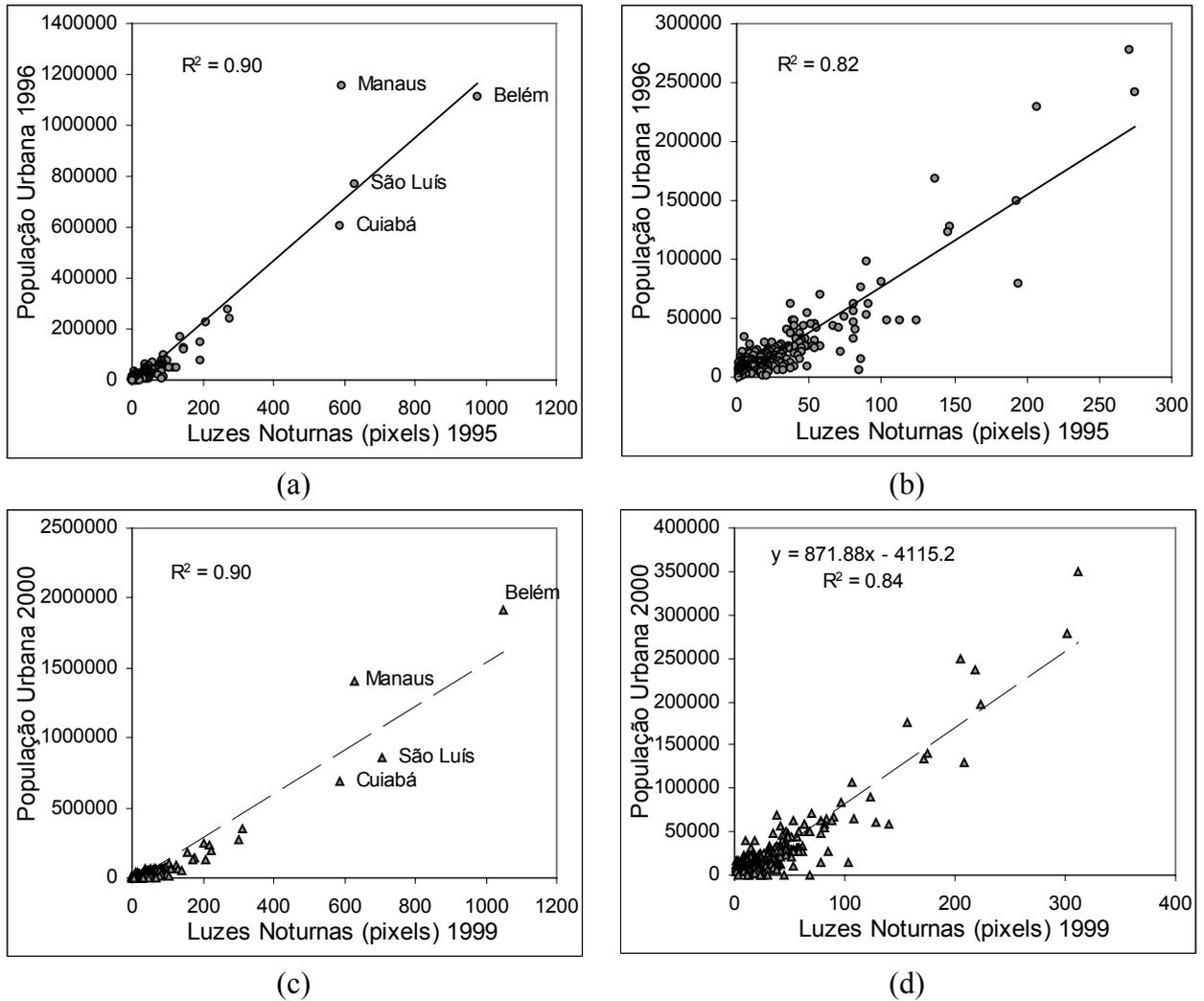


Figura 4.15 - População urbana e luzes noturnas para as unidades de análise DMSP: Relações para o mosaico DMSP-1995 (a) e (b), e para o mosaico DMSP-1999 (c) e (d). Unidades referentes à Cuiabá, São Luís, Belém e Manaus foram excluídos nos gráficos (b) e (d).

Os valores de F obtidos para a análise de variância das regressões (Tabela 4.6) confirmam as relações lineares entre as variáveis indicadas pelos valores de  $R^2$ . Altos valores de erro quadrático médio (rms) são decorrentes da variação entre valores de população urbana registrados entre 77 e 1.918.073 habitantes.

Os resultados desta análise de regressão motivaram a realização de um exercício para estimar a população urbana tendo-se como base as imagens mosaico de luzes noturnas de 2002 e 2003 geradas neste trabalho e descritas anteriormente.

TABELA 4.6 – Análise da regressão linear entre luzes noturnas no mosaico de imagens DMSP (*pixels*) e População Urbana.

| <b>Relação</b>                     | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>n</b> | <b>F</b> | <b>F<sub>valor P</sub></b> | <b>rms</b> |
|------------------------------------|----------------------|----------|----------|----------------------------|------------|
| DMSP-1995 x População Urbana 1996  | 0,90                 | 248      | 2349,74  | 7,2E-128                   | 37230      |
| DMSP-1995 x População Urbana 1996* | 0,81                 | 244      | 1077,61  | 4,1E-91                    | 14629      |
| DMSP-1999 x População Urbana 2000  | 0,90                 | 225      | 2047,32  | 2,3E-111                   | 55144      |
| DMSP-1999 x População Urbana 2000* | 0,84                 | 221      | 1188,18  | 2E-90                      | 17366      |

\* Excluindo-se Belém, Manaus, São Luís e Cuiabá

A equação que relaciona a população urbana do censo 2000 com os valores de *pixels* de luzes noturnas no mosaico DMSP-1999 (Figura 4.15d) foi usada para estimar os valores de população urbana a partir dos mosaicos DMSP-2002 e DMSP-2003. Para manter a mesma reciprocidade de datas entre o mosaico DMSP e valores de população urbana, considerou-se que a imagem DMSP-2002 estimaria a população urbana de 2001 e a imagem DMSP-2003 estimaria a população urbana de 2002.

Para validar este modelo linear foi utilizada a projeção do IBGE, divulgada no Diário Oficial da União (D.O.U.) em 07/01/2003 (IBGE, 2003), cuja metodologia foi inicialmente proposta por Madeira e Simões (1972), baseia-se na repetição da tendência de crescimento populacional do município entre dois Censos Demográficos consecutivos para o próximo período intercensos (IBGE, 2002).

Os resultados podem ser analisados quanto ao diagrama de dispersão entre os valores observados da projeção IBGE para 2001 e 2002 e os valores estimados a partir do mosaico de luzes noturnas DMSP-2002 e DMSP-2003 (Figura 4.16). Belém, Manaus, São Luís e Cuiabá foram excluídos desta análise. Comparando-se à projeção da população IBGE-2001, a população urbana foi em sua maioria superestimada pelo mosaico DSMP-2002. Para municípios com população urbana inferior a 50.000 habitantes as superestimativas são ainda mais freqüentes. Este fato pode ser explicado pelo modelo de regressão utilizado ter-se originado da relação linear entre população e os dados de luzes do mosaico DMSP-1999. Este mosaico resultou de um conjunto

pequeno de imagens (16 passagens no mês de setembro de 1999) e por isso sujeito à influência da cobertura de nuvens. De uma maneira geral, os focos de luzes no mosaico DMSP-1999 foram menos extensos que os obtidos para 2002. Há um número maior de focos de luzes noturnas no mosaico DMSP-2002 (516) que no mosaico DMSP-1999 (243) e a área média dos focos é ligeiramente maior em 2002 ( $40 \text{ km}^2$ ) que em 1999 ( $37 \text{ km}^2$ ).

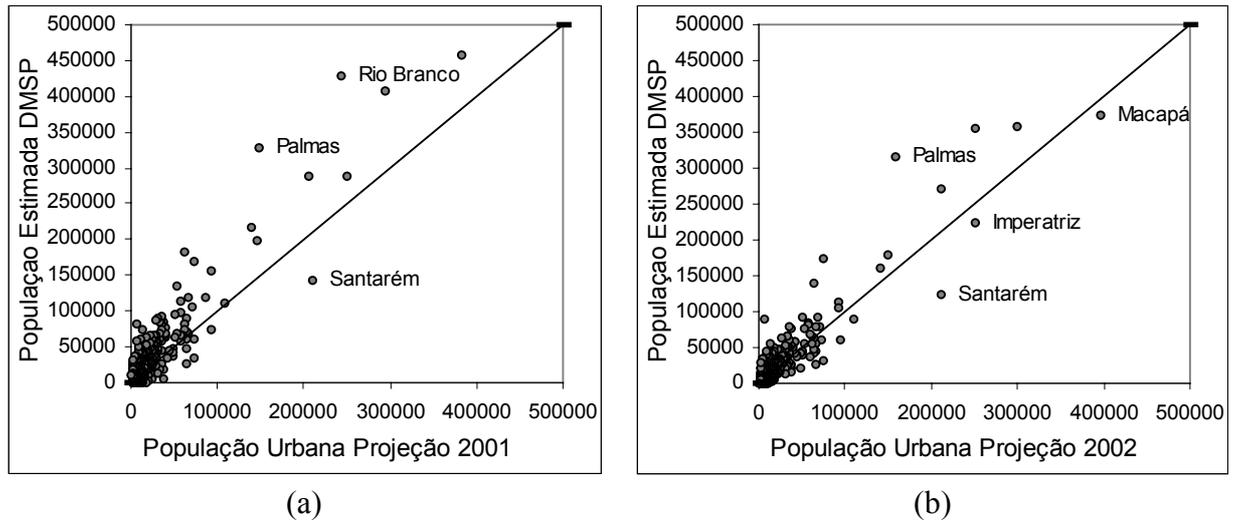


Figura 4.16 – Diagramas de dispersão entre (a) população urbana estimada pelo mosaico de luzes DMSP-2002 e a projeção IBGE-2001; e (b) entre população urbana estimada DMSP-2003 e a projeção IBGE-2002.

A média das diferenças correspondeu a 11.040 habitantes entre os 428 municípios analisados. Estes têm em média 19.773 habitantes de população urbana projetada para 2001. Para Santarém, a área de luzes (número de *pixels*) nos mosaicos DMSP-1999 e DMSP-2002, indicaram ligeiro crescimento de 156 para 168 *pixels*, respectivamente. Porém, a previsão de crescimento da população para o período foi superior à tendência detectada pelas luzes noturnas.

A estimativa da população urbana a partir do mosaico de luzes noturnas DMSP-2003 (Figura 4.16b) apresentou erros bem distribuídos em relação à população projetada para os municípios em 2002. A média das diferenças correspondeu a 4.928 habitantes para os 385 municípios analisados. Estes têm em média 21.831 habitantes de população urbana projetada para 2002. Para Santarém, a mesma tendência de subestimar população urbana apresentada em 2001 foi observada para 2002.

Como o procedimento metodológico para a geração das imagens mosaico de luzes noturnas foi estruturado e permitiu compor mosaicos para períodos sistemáticos, tornou-se possível fazer o acompanhamento da evolução da população urbana associada a presença de luzes noturnas a partir deste conjunto de dados iniciais. Para uma atividade de monitoramento deste tipo, sugere-se que um modelo básico para o mosaico DMSP-2002 seja definido utilizando-se valores de população amostrados para o mesmo ano (PNAD-2000) e não, simplesmente através de valores de projeção, como os utilizados neste exercício.

#### **4.4 Observações da expedição de campo**

Durante expedição de campo entre 15 e 30 de maio de 2000 foram percorridos 551 km pela PA-150 de Belém a Marabá. Ao longo deste percurso, 49 localidades de aglomerados humanos tiveram suas coordenadas geográficas registradas através de GPS. Destas, 30 localidades dispunham de iluminação pública: 21 vilas e 9 agrupamentos de casas. Foram registrados 2 vilas e 5 agrupamentos de casas sem iluminação externa.

Quando sobrepostos ao mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP de 2002, apenas as sedes de município (Abaetetuba, Moju, Tailândia, Goianésia do Pará, Jacundá, Nova Ipixuna e Marabá) e uma vila tiveram suas luzes noturnas registradas. A maioria destas sedes de município tem a rodovia como principal eixo de desenvolvimento urbano, conforme registrado para Goianésia (Figura 4.17). Ressalta-se ainda o fato da única vila identificada no mosaico DMSP-2002 estar próxima a Marabá, capital regional do sudeste paraense, e corresponder ao entroncamento da PA-150 com a Transamazônica de intensa iluminação no trevo, semelhante à iluminação registrada em Goianésia do Pará (Figura 4.17).

Ao percorrer a zona rural de Marabá, visitou-se a localidade chamada Brejo do Meio, um povoado com aproximadamente 2.000 habitantes, de área aproximada de 2,5 km<sup>2</sup> e infra-estrutura urbana semi-consolidada: arruamento (sem asfalto), praças, escolas, igreja e iluminação externa. Porém nenhum indício deste povoado foi registrado nas luzes noturnas do mosaico DMSP-2002.

Duas questões ficaram evidentes a partir destes registros de campo: apenas áreas extensas maiores que 2,5 km<sup>2</sup> e intensamente iluminadas foram registradas no mosaico de 2002. Este por sua vez, foi obtido com maior cobertura temporal que o mosaico DMSP-1999. Por outro lado, os registros de início e término das áreas iluminadas nas sedes de município ao longo da rodovia, coincidiram com os limites dos focos de luzes noturnas DMSP-2002 (Figura 4.17). Isto comprova a correspondência de posicionamento geográfico dos registros de luzes quanto à expansão da estrutura de iluminação e pode ser considerado um parâmetro indicador da urbanização.

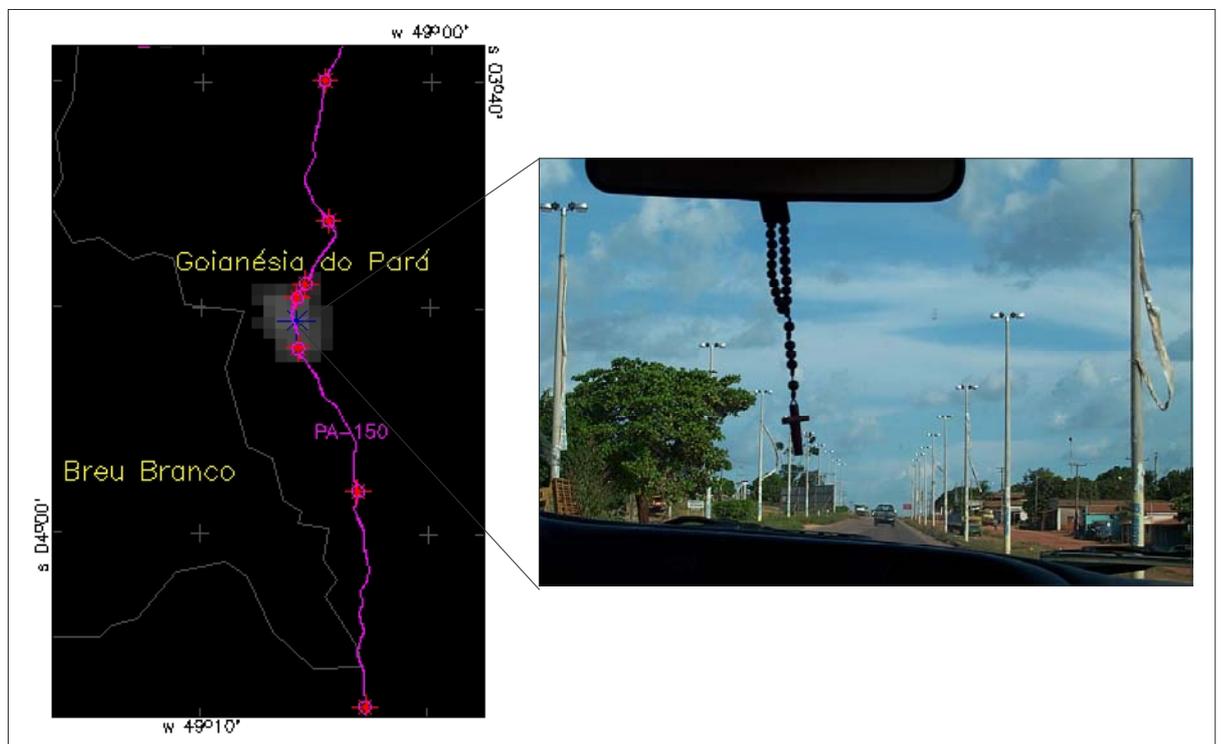


Figura 4.17 – Mosaico de luzes noturnas DMSP-2002 com percurso de campo sobreposto – localidades populadas ao longo da PA-150, detalhe da iluminação pública em Goianésia do Pará.

#### 4.5 Considerações do capítulo

Além do procedimento metodológico padrão desenvolvido anteriormente pelo NGDC, foram apresentadas técnicas alternativas para geração de um mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP/OLS entre janeiro a junho de 2002. Com o objetivo de gerar um produto de sensoriamento remoto para estudos de população na região Amazônica, procurou-se identificar a ocorrência de luzes estáveis no conjunto de imagens. De todos

os registros de luzes noturnas, os procedimentos implementados procuraram diferenciar aqueles atribuíveis a assentamentos humanos e atividades produtivas permanentes.

Considerando-se a elaboração do mosaico para todo o território nacional, foram identificadas duas principais condições problemáticas: regiões com intensa cobertura de nuvens e regiões suscetíveis a queimadas freqüentes. O norte e nordeste brasileiro são regiões de intensa cobertura de nuvens, e neste caso, a incerteza para se detectar luzes estáveis decorre da ausência de informação: o espaço amostral, número de dias livre de nuvens fica reduzido. Por sua vez, para as regiões de ocorrência de queimadas, o espaço amostral não constituiu fator limitante, uma vez que a cobertura de nuvens não foi intensa para o período. Porém, a dimensão e a duração das queimadas introduziram incerteza, dificultando assim, a separação dos focos de queimadas dentre as luzes estáveis. Além destas duas condições distintas, há ainda a possibilidade de se ter regiões de queimadas e com cobertura de nuvens simultaneamente, tornando a detecção de luzes estáveis ainda mais difícil.

Desta forma, uma metodologia única mostrou-se incapaz de minimizar as particularidades regionais. Uma alternativa seria o desenvolvimento de métodos híbridos que identificassem as particularidades regionais e fosse capaz de combinar métodos em função da região considerada. Para tanto seriam necessários estudos para caracterizar estas condições particulares no conjunto de imagens e aprimorar os métodos de detecção de luzes estáveis para cada um dos casos. Sugere-se que inicialmente sejam desenvolvidos procedimentos para condições muito distintas: região com nuvens, queimadas e uma região de referência de modo que uma metodologia híbrida possa ser aprimorada.

O uso de unidades de análise a partir dos próprios focos de luzes DMSP-2002 e as relações lineares entre dados DMSP e população urbana (coeficientes de determinação superiores a 0,80) indicam as limitações e o potencial dos dados de luzes noturnas para estimar população urbana na região Amazônica. A simplicidade do modelo linear e os erros obtidos entre os valores população urbana estimados pelos dados DMSP em relação aos valores das projeções IBGE (diferenças de 4.928 habitantes na média) permitem propor o uso de dados DMSP para acompanhamento da evolução da população urbana em localidades com mais de 20.000 habitantes. Para tanto, propõe-se

a calibração do mosaico de 2002 com valores censitários, de amostragem populacional referentes ao mesmo período.

Informações obtidas no trabalho de campo se por um lado evidenciaram as restrições do mosaico DMSP a para detecção de pequenos núcleos urbanizados. Por outro lado, comprovaram a precisão de posicionamento das áreas registradas. Estas informações aliadas aos resultados da comparação entre manchas urbanas detectáveis com imagens de maior resolução espacial (TM3-Landsat, descrito no Capítulo 3), sustentam a proposta de utilizar as informações do mosaico de imagens de luzes noturnas para a distribuição da população na região Amazônica.

## CAPÍTULO 5

### **SUPERFÍCIES DE DENSIDADE PARA REPRESENTAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA**

Inicialmente, este capítulo apresenta questões referentes à representação espacial da população na região Amazônica. Na seqüência, apresentam-se superfícies de densidade geradas através dos principais métodos interpoladores para dados de população e a análise comparativa destas. O objetivo de apresentar as superfícies de densidade não reside nas estimativas de população, mas em prover ferramentas para verificar tendências e padrões de distribuição da população. As informações obtidas a partir do mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP gerado para 2002 e apresentada no capítulo anterior são aqui utilizadas para definir e implementar um método multivariado de construção de uma superfície de densidade populacional, o *DMSPop<sub>M</sub>*. Finalmente, apresenta-se a análise comparativa entre a superfície proposta e os dados censitários de referência.

#### **5.1 Questões ao se representar a distribuição espacial da população na Amazônia**

A disponibilidade de dados é uma das primeiras questões a se considerar para a geração de superfícies de densidade populacional da região Amazônica. Dados censitários são obtidos regularmente a cada 10 anos pelo IBGE. Nos períodos entre censos, contagens de população baseadas em amostragem são eventualmente realizadas como a de 1996. Estimativas da população baseadas em dados estatísticos são realizadas anualmente pelo IBGE na chamada Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). Nestas, os dados são apresentados para o Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Regiões Metropolitanas. Porém, para a região norte, as estimativas referem-se somente à parcela urbana da população (IBGE, 1999).

Outro aspecto importante é a indexação espacial da informação. Até o censo de 2000, a unidade espacial de representação da população restringia-se ao limite municipal. Embora os dados fossem coletados por setor censitário, apenas a malha municipal era disponibilizada como limite territorial oficial do IBGE. Os limites dos setores censitários não se encontravam disponíveis em formato digital. Foram disponibilizados

apenas as descrições dos limites em mapas analógicos. Desta forma, qualquer análise espacial da população que demande dados pretéritos deverá considerar o limite municipal como restrição espacial. Ainda que os dados para o censo de 2000 estejam disponíveis por setor censitário, a dimensão dos municípios na Amazônia ocasiona setores censitários muito extensos.

Um setor censitário corresponde à área que um recenseador tem capacidade de visitar em um mês, ou seja, equivale a aproximadamente 350 domicílios em áreas rurais e a 250 domicílios em áreas densamente povoadas. Desta forma, em muitos locais da Amazônia, um setor pode compreender extensas áreas e com grande heterogeneidade. A Figura 5.1 mostra um exemplo dos setores censitários em Governador Jorge Teixeira (RO). São observados setores de aproximadamente 110 km<sup>2</sup> e de limites regulares nas regiões de assentamentos agropecuários e setores maiores (300 km<sup>2</sup> em média), de limites irregulares em áreas de floresta, na região oeste do município.

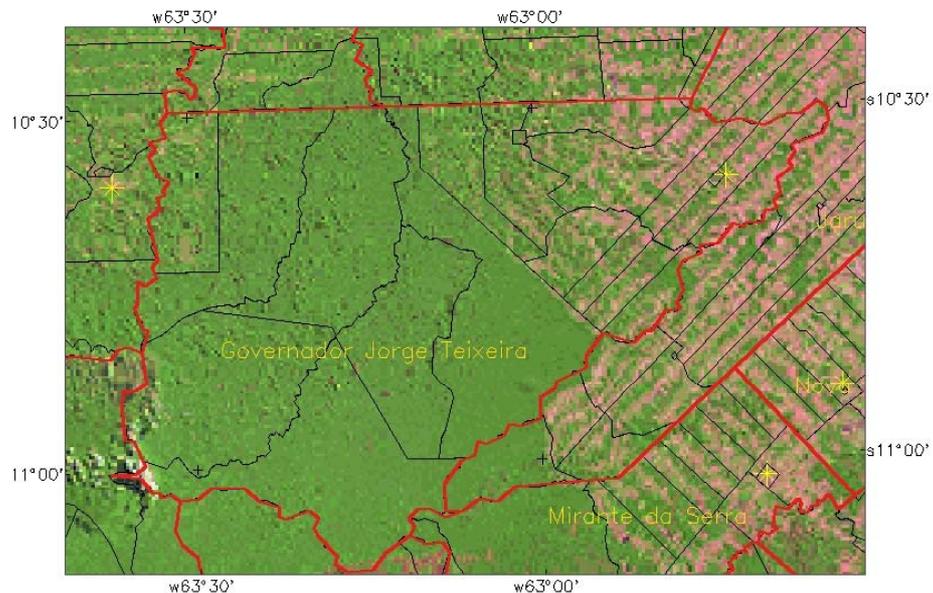


Figura 5.1 – Setores censitários 2000 do município de Governador Jorge Teixeira (RO) sobre composição colorida de imagem TM-Landsat (R5G4B3).

A heterogeneidade da região é outro fator que deve ser considerado em qualquer estudo sobre a Amazônia. Um primeiro aspecto refere-se ao fato da área dos municípios ser muito variável: de 64 km<sup>2</sup> em Raposa (MA) a 160.000 km<sup>2</sup> em Altamira (PA). A área média para os 756 municípios da Amazônia Legal é de 6.770 km<sup>2</sup>. Porém, o desvio padrão é de aproximadamente 14.000 km<sup>2</sup>. Esta grande variação é patente ao

observarmos diferentes estados e considerando-se dois extremos: em Rondônia, a média de área dos 52 municípios é de 4.600 km<sup>2</sup>, por outro lado, no Amazonas, a média dos 62 municípios é de 25.800 km<sup>2</sup>. As áreas dos municípios, excluindo-se aqueles que contêm as metrópoles, vão se refletir na dimensão dos seus respectivos setores censitários.

Outra questão importante é a complexidade dos processos de ocupação do território que acabam por condicionar a distribuição espacial da população. Rondônia por exemplo, recebeu muitos migrantes, alojou vários assentamentos do INCRA, e sofreu uma rápida e intensa conversão da floresta em pastagem. O estado possui núcleos urbanos concentrados ao longo dos eixos viários e a população mais concentrada na zona rural. No estado do Amazonas a densidade de núcleos urbanos é muito menor e observa-se uma grande concentração da população em Manaus devido à atividade industrial da Zona Franca. A tendência atual observada para a região pode ser caracterizada por um processo crescente de desconcentração da população das grandes metrópoles e maior participação relativa das cidades de até 100.000 habitantes, verificada a partir do crescimento elevado da população em núcleos pequenos de 20.000 habitantes (Becker, 1998). Fora dos limites urbanos, a população encontra-se dispersa pela zona rural e ao longo dos rios. As extensas áreas de floresta contínua, principalmente na Amazônia oriental constituem os vazios demográficos.

A dimensão humana, entendida aqui como um necessário olhar para as populações locais, tem sido considerada essencial na definição e condução de projetos de pesquisa para a região Amazônica. Estudos de mudanças climáticas globais como os realizados pelo Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA, 2003), bem como os estudos de alterações no uso e cobertura do solo deverão considerar a presença das atividades humanas como fator não apenas condicionante, mas também, como elemento que sofre as conseqüências das alterações. Recentemente, de um esforço conjunto dos centros de pesquisa do Ministério da Ciência e Tecnologia foi criado o GEOMA. O GEOMA é uma rede temática de cooperação científica com o objetivo de executar projetos interdisciplinares na área de modelagem ambiental na Amazônia. Pretende-se criar modelos matemáticos para estudar a Amazônia e um dos aspectos abrangidos inclui a dinâmica dos assentamento humanos nesta região. Um exemplo é ilustrado pelo projeto “Estudo das mudanças de cobertura e uso da terra” em 2002-2003,

que analisa a expansão do desflorestamento e a dinâmica social entre os municípios de Marabá e São Félix do Xingu, no sul e no centro do Pará, onde têm sido observadas altas taxas de desflorestamento sob condições complexas de apropriação de terras, relações de trabalho e exclusão/inserção social (Geoma, 2003).

A representação mais freqüentemente utilizada em análises geográficas e demográficas é através do mapa temático dos municípios. A Figura 5.2 apresenta o mapa temático da população residente obtida no censo 2000, para a malha municipal divulgada pelo IBGE para 1997. Ao se comparar as Figuras 5.2 e 5.3 verifica-se a importância de se representar contingente populacional por unidade de área, ou seja, densidade demográfica, ao invés do valor da população total. A definição dos intervalos de densidade populacional e o critério adotado alteraram completamente a visualização e representação espacial da densidade de população. Para a Figura 5.3, definiu-se quantis de densidade demográfica ao invés de população total. Observa-se uma configuração completamente diferente, ressaltando as regiões mais densamente ocupadas e os vazios demográficos entre elas.

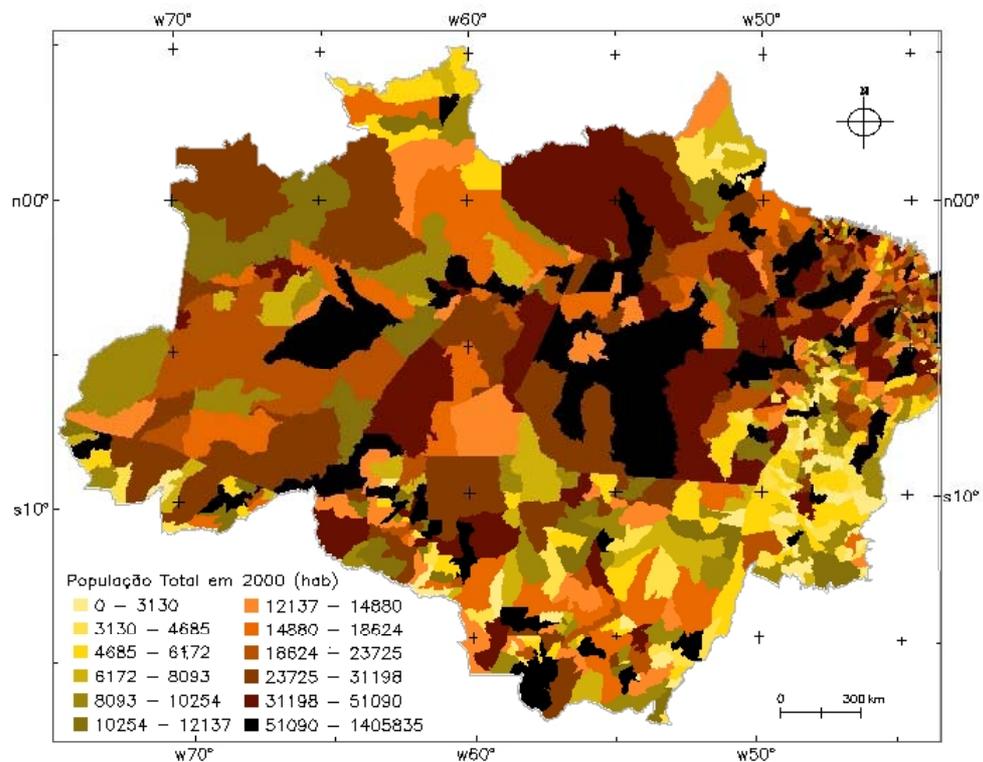


Figura 5.2 – Mapa temático da população total (habitantes) por município no censo IBGE - 2000.

Um detalhamento desta representação consistiria em desagregar a população gerando superfícies de densidade que reflitam a distribuição da população não por seu limite de município, mas por células de uma grade. A representação espacial da população através de modelos é uma tentativa de contornar a restrição dos limites de área gerando superfícies. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam as superfícies de densidade de população obtidas a partir dos limites dos municípios representados nas malhas municipais do IBGE de 1991, 1994 e 1997, assim como, dos valores de população total para os dados de população de 1991, 1996 e 2000, respectivamente.

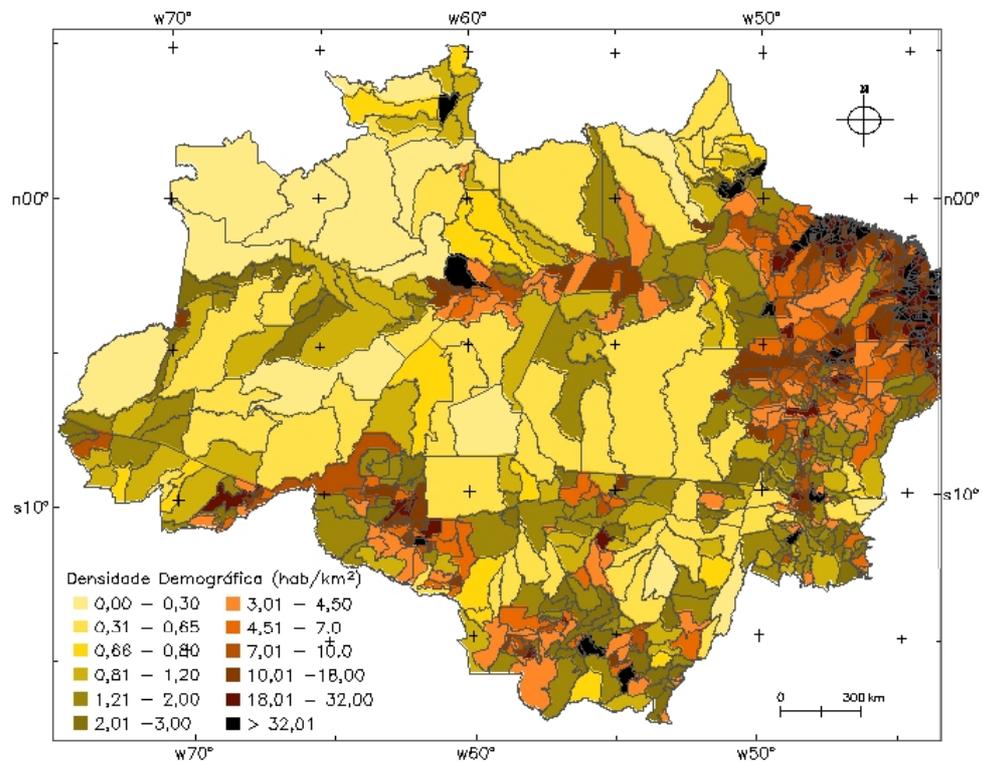


Figura 5.3 – Mapa temático da densidade populacional (habitantes/km<sup>2</sup>) por município no censo IBGE – 2000.

Os modelos procuram reconstruir de alguma forma o sistema das unidades de coleta de dados (zonas) pelos limites de suas áreas ou através de pontos relacionados. A densidade populacional é considerada um fenômeno contínuo no espaço modelada em superfícies. A idéia é remodelar a distribuição geográfica da população, adquirida por censos, recuperando a distribuição da população no maior detalhamento possível. O dado original é remodelado em grades regulares geograficamente referenciadas, onde cada célula contém valores estimados de população. Diferentes técnicas de interpolação

são apresentadas na literatura para gerar superfícies de densidade populacional. As mais usuais foram descritas no Capítulo 2 deste trabalho.

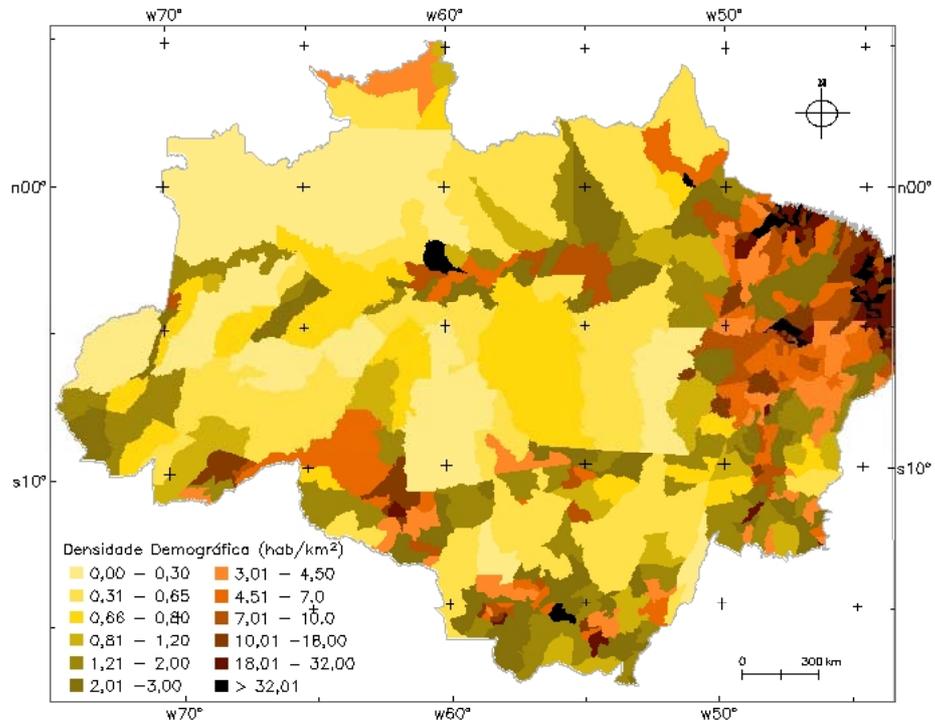


Figura 5.4 – Densidade de população (habitantes/km<sup>2</sup>) para o censo IBGE – 1991.

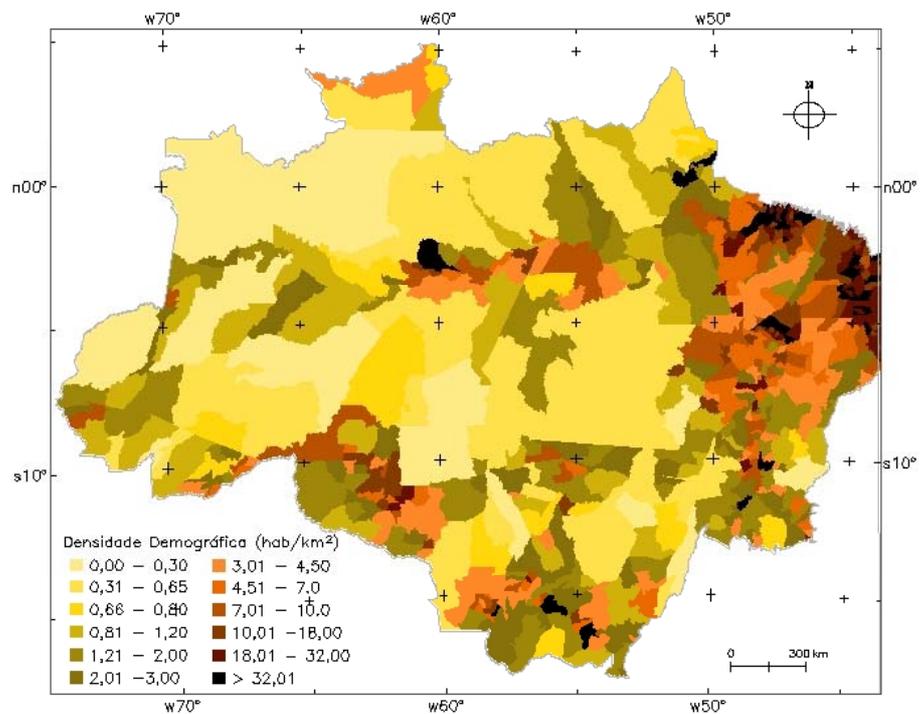


Figura 5.5 – Densidade de população (habitantes/km<sup>2</sup>) para a contagem IBGE – 1996.

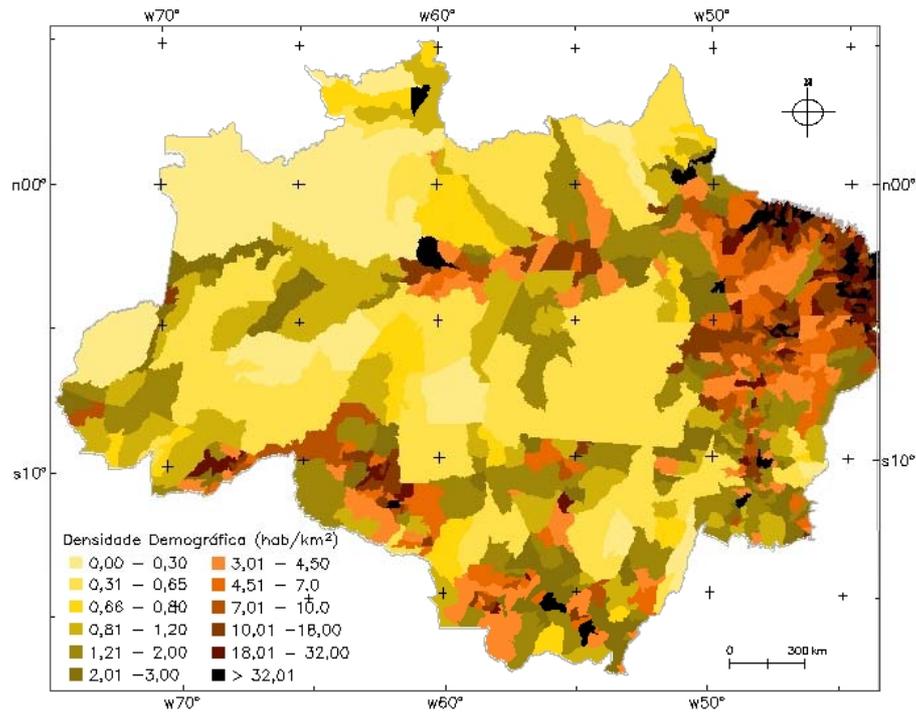


Figura 5.6 – Densidade de população (habitantes/km<sup>2</sup>) para o censo IBGE – 2000.

Apresenta-se a seguir a construção de diferentes superfícies de densidade de população para a Amazônia Legal realizadas a partir de diferentes técnicas de interpolação e uma análise comparativa entre elas.

## 5.2 Superfícies de densidade demográfica para a Amazônia Legal

Três técnicas de interpolação univariadas considerando apenas a variável população foram utilizadas para gerar superfícies de densidade genéricas para a Amazônia Legal, a saber: a krigagem (Krige, 1951; Oliver e Webster, 1990); o método Picnofilático de Tobler (Tobler, 1979) e o método dos centróides ponderados de Martin ou SurPop (Martin, 1989). Utilizando informações de luzes noturnas do mosaico DMSP/OLS uma técnica multivariada para criar superfície de densidade de população foi proposta. Nesta, os valores de população são ponderados pela área e a extensão e localização das áreas urbanas foram obtidas a partir do mosaico DMSP-2002.

### 5.2.1 Krigagem para superfícies de densidade de população na Amazônia

Para gerar superfícies de densidade de população na Amazônia através da técnica de krigagem ordinária foram utilizados os valores de população total dos censos de 1991 e

2000 e a contagem populacional de 1996. A densidade foi calculada ponderando-se o total dos residentes pela área de cada município. Os valores de área foram obtidos a partir dos limites geográficos divulgados pelo IBGE nas malhas municipais de 1991, 1994 e 1997 referentes aos dados de população do IBGE para 1991, 1996 e 2000 respectivamente.

Optou-se por utilizar o logaritmo da densidade populacional, uma vez que os valores de densidade têm uma grande variabilidade e a krigagem um processo gaussiano estacionário para a variável a ser interpolada. Estes valores então foram atribuídos às coordenadas geográficas das sedes municipais e, considerando-se a densidade populacional como isotrópica, fez-se o estudo dos semivariogramas para os quais obteve-se ajustes adequados ao modelo esférico para 1991 e ao modelo gaussiano para 2000 e 1996, conforme indicam os coeficientes de Akaike (1974) na Tabela 5.1. Observa-se que os parâmetros das curvas de ajuste foram muito semelhantes, o que era esperado por se tratar da mesma variável em épocas distintas.

Comparando-se os mapas temáticos que representam as superfícies de densidade geradas pela krigagem (Figuras 5.7, 5.8 e 5.9) e os mapas da densidade demográfica obtida através do limite das malhas municipais (Figuras 5.4, 5.5 e 5.6) respectivamente, tem-se nas superfícies resultantes de krigagem uma generalização dos valores e limites das classes. Apesar de não permitir medidas precisas do valor de densidade populacional, as superfícies resultantes da krigagem têm o mérito de facilitar a compreensão de tendências difíceis de serem apreendidas somente pela observação dos limites municipais.

TABELA 5.1 – Parâmetros dos modelos de ajuste dos semivariogramas para densidade populacional de 1991, 1996 e 2000.

| <b>Densidade Populacional</b> | <b>Modelo</b> | <b>Akaike</b> | <b>Pepita</b> | <b>Contribuição</b> | <b>Alcance</b> |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|----------------|
| <b>1991</b>                   | Esférico      | -61,19        | 0.13          | 0.34                | 1214859,00     |
| <b>1996</b>                   | Gaussiano     | -54,13        | 0.16          | 0.32                | 1059087,63     |
| <b>2000</b>                   | Gaussiano     | -64,58        | 0.89          | 1,75                | 1100068,89     |

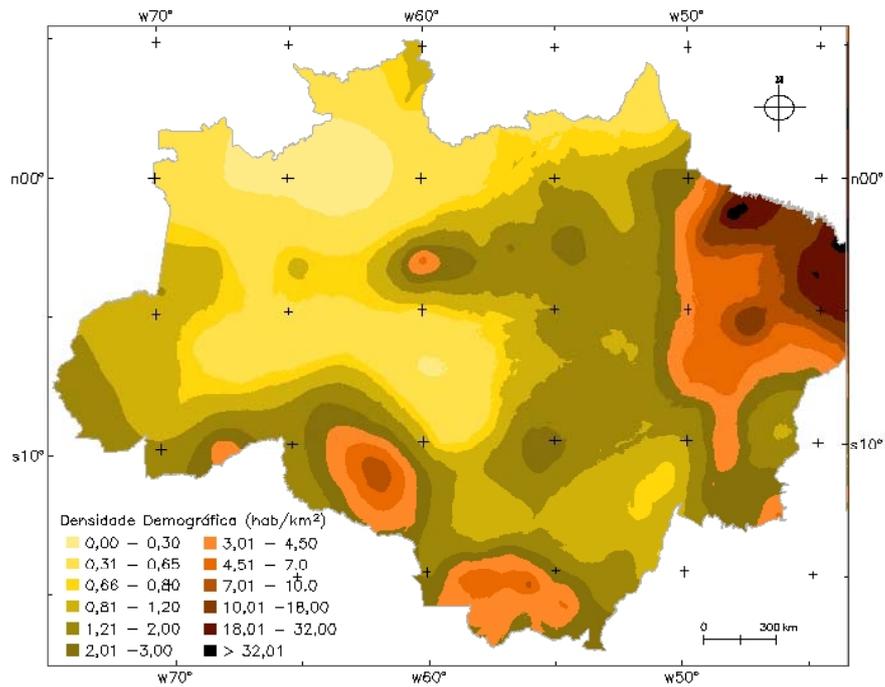


Figura 5.7 – Mapa temático da densidade populacional total 1991 obtido através de krigagem ordinária.

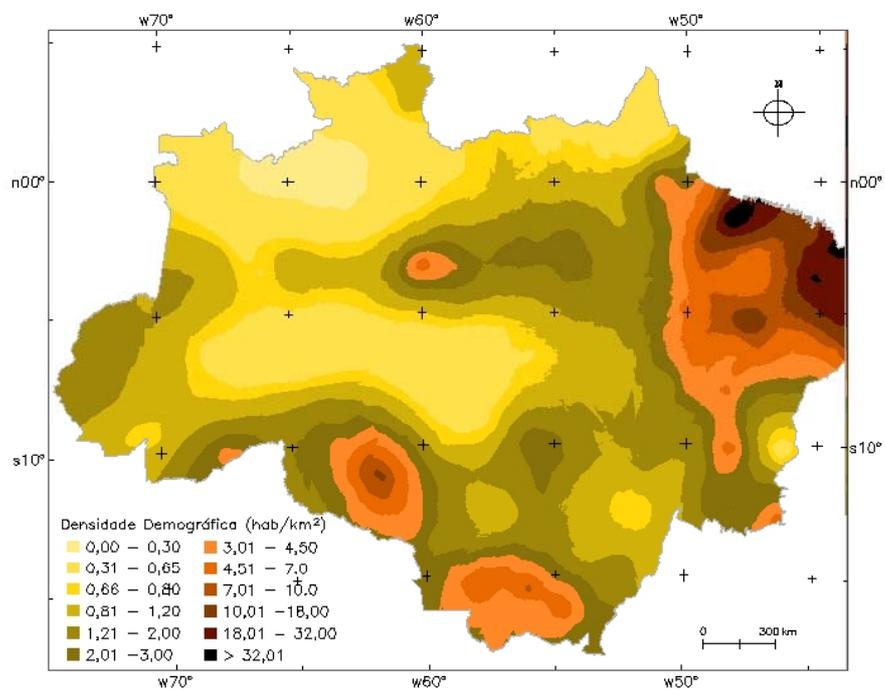


Figura 5.8 – Mapa temático da densidade populacional total 1996 obtido através de krigagem ordinária.

A grande mancha de baixa densidade populacional compreendendo o estado do Amazonas e o norte dos estados do Amapá, Pará e Roraima vai se retraindo durante o

período, com maior intensidade entre 1996 e 2000 e desmembrando-se em três manchas menores. A influência de Manaus e dos municípios de Coari, Tefé e Alvarães na calha do rio Amazonas a oeste podem ser responsabilizados por este padrão. A classe de 0,8 a 1,2 hab/km<sup>2</sup> foi unificada à região de São Paulo de Olivença e Benjamin Constant e Tabatinga na fronteira oeste do estado do Amazonas. Verificou-se assim, o delineamento de um eixo leste-oeste de Tabatinga – Tefé – Manaus – Santarém.

Observa-se assim que a evolução das superfícies apresentadas permitiu construir algumas hipóteses quanto às tendências de desenvolvimento demográfico, como por exemplo, a identificação dos principais eixos de intensificação demográfica graficamente representados na Figura 5.9.

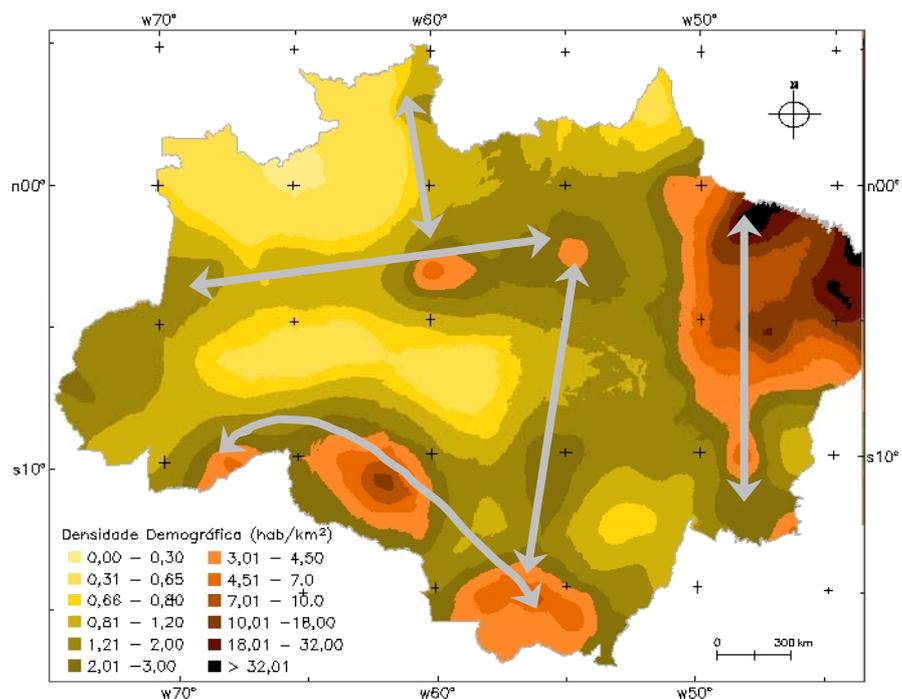


Figura 5.9 – Mapa temático da densidade populacional total 2000 obtido através de krigeagem ordinária. Representação gráfica dos principais eixos de intensificação demográfica sobrepostos.

No oeste do Pará e Maranhão a grande mancha de maiores densidades demográficas também apresenta intensificação, principalmente no entorno de Belém, São Luís e Imperatriz. As classes de densidade acima de 3 hab/km<sup>2</sup> alongam-se acompanhando o eixo Belém – Imperatriz – Palmas em direção à Goiânia.

A mancha de baixa densidade a leste de Palmas, no limite do Tocantins com Goiás aumentou em 1996 e diminuiu novamente em 2000. Este comportamento pode ser atribuído à criação dos municípios de São Félix do Tocantins e Mateiros em 1993 desmembrados do município de Lizarda. O mesmo acontece com Santa Rosa do Purus na fronteira do Acre com o Peru.

O estado de Rondônia também se destacou como uma região de intensificação da densidade populacional. O sul do Mato Grosso mostrou-se relativamente estável. O crescimento da densidade na região de Rio Branco (AC) entre 1996 e 2000 e o alongamento da mancha de Rondônia indicaram uma possível união destas regiões definindo o eixo Cuiabá – Porto Velho – Rio Branco. De Cuiabá para o norte também encontraram-se indícios da ligação Cuiabá – Sinop/Alta Floresta – Santarém.

O estado de Roraima merece destaque ao condicionar a intensificação das classes de fraca densidade populacional. Isto pode ser explicado em parte, pela urbanização intensa observada na região com 61% da população do estado concentrada em Boa Vista em 2000. Esta capital deverá se unir a Manaus definindo outro eixo sul-norte.

### **5.2.2 Picnofilático de Tobler**

O uso do interpolador Picnofilático de Tobler, considerando a malha municipal de 1997 e os valores de população total por município de 2000, foi utilizado para gerar uma superfície de densidade mais atualizada para a região Amazônica. O mapa temático resultante com os mesmos intervalos de classes definidos anteriormente para a densidade demográfica por município (Figura 5.3), é apresentado na Figura 5.10. Observa-se uma representação espacial da população um pouco melhor que o mapa coroplético dos municípios, com a diferença que os limites entre as regiões foram suavizados. O efeito de continuidade do interpolador foi verificado apenas nos municípios do Maranhão com áreas pequenas e densidades similares.

Para verificar se este método realmente proporcionaria melhores resultados utilizando dados adquiridos em pequenas unidades, gerou-se uma superfície considerando os setores censitários da Amazônia (Figura 5.11). Comparando-se com o mapa temático das densidades demográficas por limites do setor censitário (Figura 5.12), observa-se

que o método Picnofilático representa melhor as unidades que são pequenas, mais homogêneas e similares entre seus vizinhos. Vale lembrar que a representação da densidade populacional através dos limites dos setores censitários em células de uma grade, pode ser considerada como resultante do método de ponderação da população pela área. Ao mesmo tempo, há um exagero dos limites concentrando ainda mais a densidade populacional em regiões de altas densidades e criando uma feição indesejada com áreas de baixa densidade adjacentes. Esta feição é apenas observada ao se analisar o detalhe e em regiões de alta densidade demográfica como ocorre no Maranhão, região de Belém ou Rondônia. Um exemplo de detalhe para a região de São Francisco do Guaporé e Seringueiras em Rondônia é apresentado na Figura 5.13.

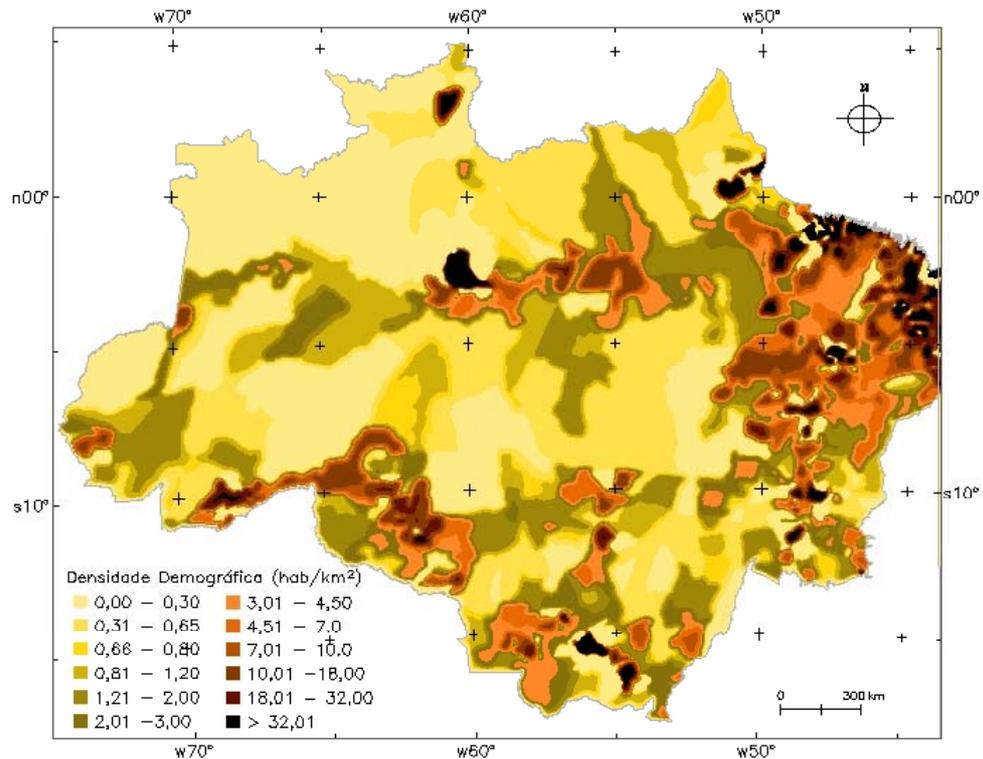


Figura 5.10 - Mapa temático da superfície de densidade obtida através do método Picnofilático de Tobler, com dados de população total do Censo 2000 e malha municipal de 1997.

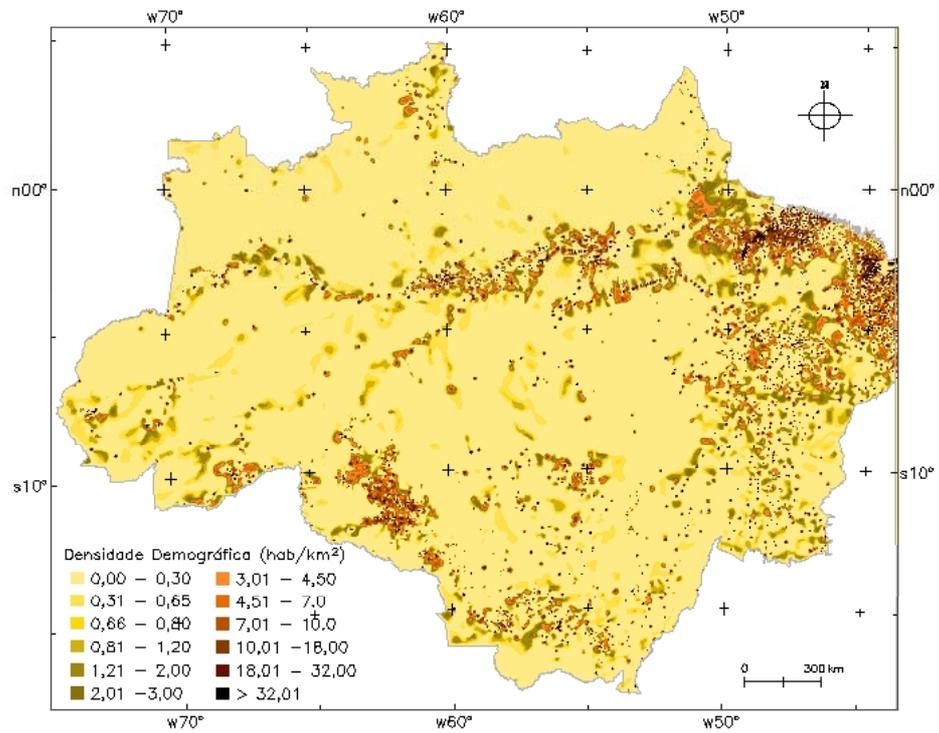


Figura 5.11 - Mapa temático da superfície de densidade obtido através do método Piconofilático de Tobler, para a população dos setores censitários 2000.

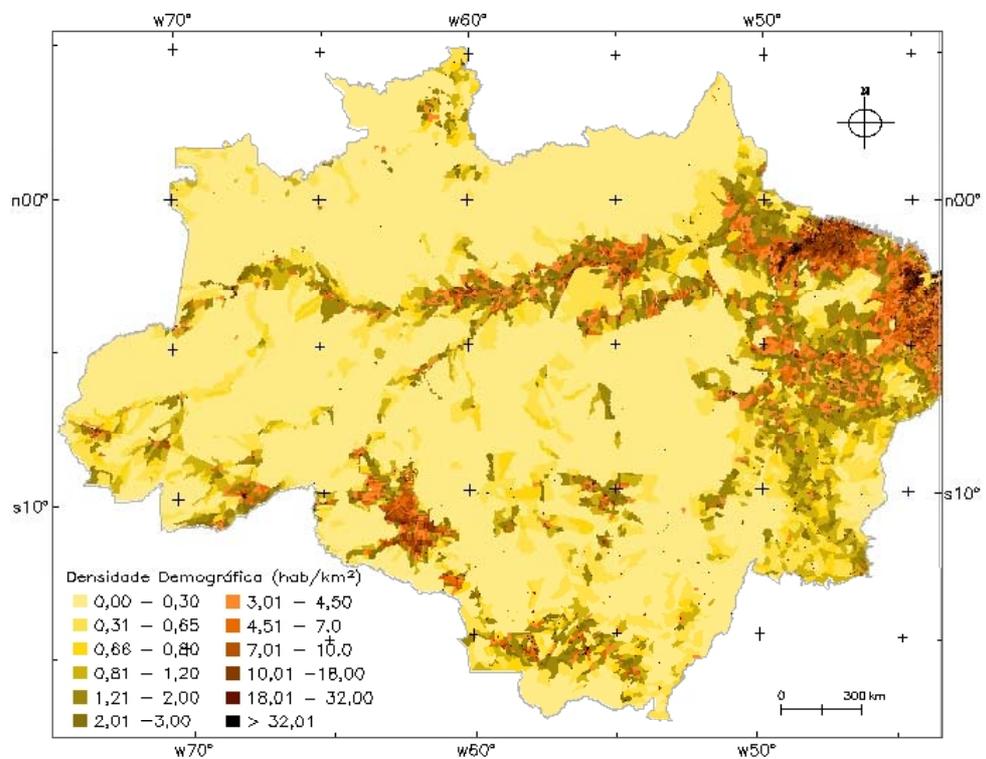


Figura 5.12 – Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método de ponderação pela área.

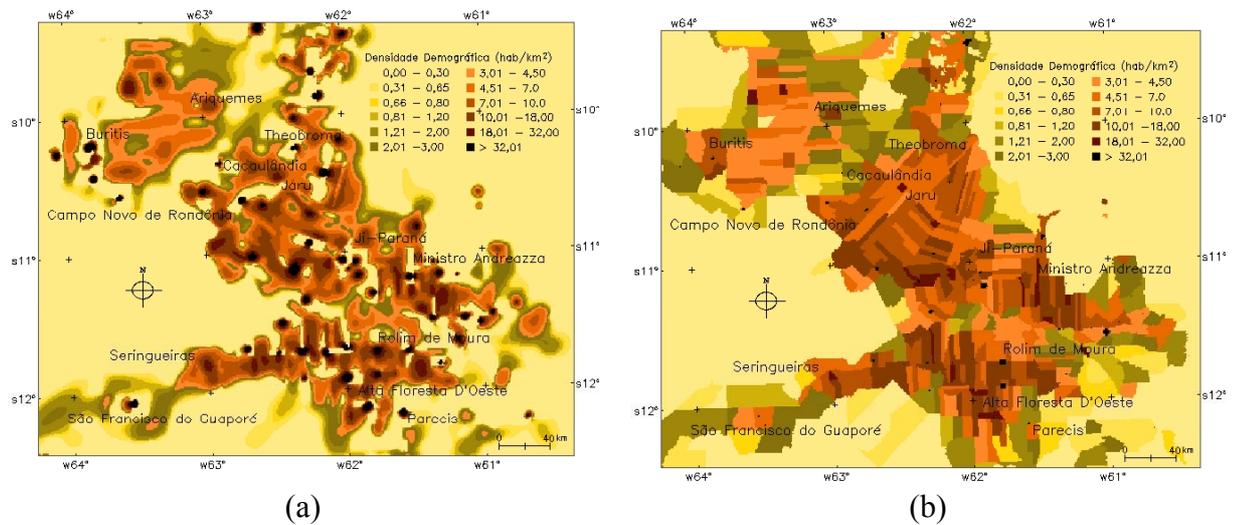


Figura 5.13 - Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método Piconofilático de Tobler (a) e ponderação pela área (b) para Rondônia.

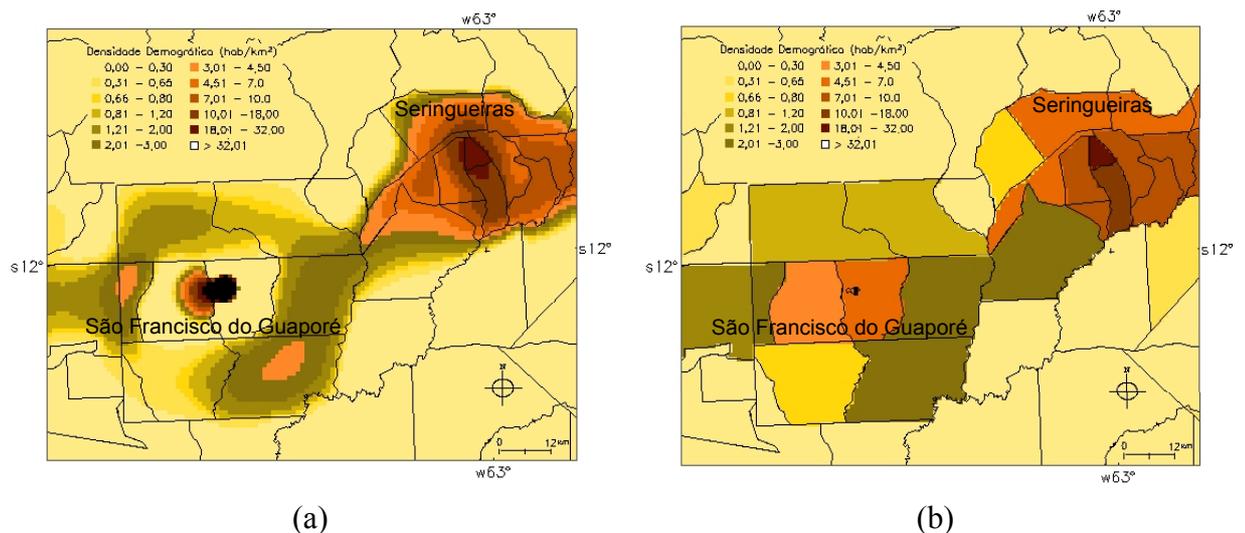


Figura 5.14 - Mapa temático da superfície de densidade populacional dos setores censitários 2000 – obtido pelo método Piconofilático de Tobler (a) e ponderação pela área (b) para a região de Seringueiras (RO).

Os setores com maior densidade concentraram o volume enquanto que as regiões de entorno apresentam baixa densidade. Em São Francisco do Guaporé (Figura 5.14) a densidade foi concentrada no setor urbano e o entorno, anteriormente de classe intermediária de densidade (de 3,0 a 7,0 hab/km<sup>2</sup>), passou para as classes de densidade mais baixas (de 0 a 0,86 hab/km<sup>2</sup>). Mesmo reduzindo-se o número de iterações para distribuir os valores de população nas células da grade (de 100 para 10 iterações) no método Piconofilático, o efeito ainda assim persistiu. O algoritmo de redistribuição de

população soluciona as discrepâncias entre os vizinhos mais próximos porém, não contempla a continuidade da região, ou seja, entre os vizinhos um pouco mais distantes. Quando as classes de entorno são mais semelhantes este efeito não ocorre como o observado no detalhe (Figura 5.14) para a região de Seringueiras.

### **5.2.3 Centróides ponderados de Martin - *kernel***

Utilizando o interpolador dos centróides ponderados de Martin e os dados de população total dos distritos no censo 2000, gerou-se uma superfície de densidade para Amazônia Legal (Figura 5.15). Para esta superfície a população total e a localização geográfica dos distritos foram considerados centróides, para os quais definiu-se um raio de busca inicial de 30 km. Os vazios demográficos foram preservados e as regiões de maior densidade de municípios apresentaram-se com um gradiente de população. Esta superfície não apresenta feições referentes aos limites municipais mas corresponde a uma expansão da localização dos distritos.

Para que o interpolador de Martin pudesse gerar superfícies mais contínuas e compatíveis com a realidade Amazônica, seria necessária a inclusão criteriosa de centróides que permitissem descrever a concentração de população no conjunto dos dados. Diferentemente da disponibilidade de dados no Reino Unido, local para onde este interpolador foi originalmente desenvolvido, os dados censitários disponíveis para o Brasil não fornecem a localização destes centros de concentração da população. Uma alternativa foi utilizar os centros geométricos dos setores censitários para verificar se haveria um melhor desempenho do interpolador. A superfície resultante do interpolador de Martin sobre os centros geométricos dos setores censitários e população total do setor em 2000 pode ser observada na Figura 5.16. A grade regular de 1 km de resolução é resultante de um raio de busca de 10 km sobre cada centróide. O detalhamento espacial revela feições de distribuição particulares como o padrão em espinha-de-peixe de Rondônia, as regiões mais densamente povoadas próximas a Belém e São Luis, a calha do Rio Amazonas e Madeira e a ocupação na Transamazônica no Pará.

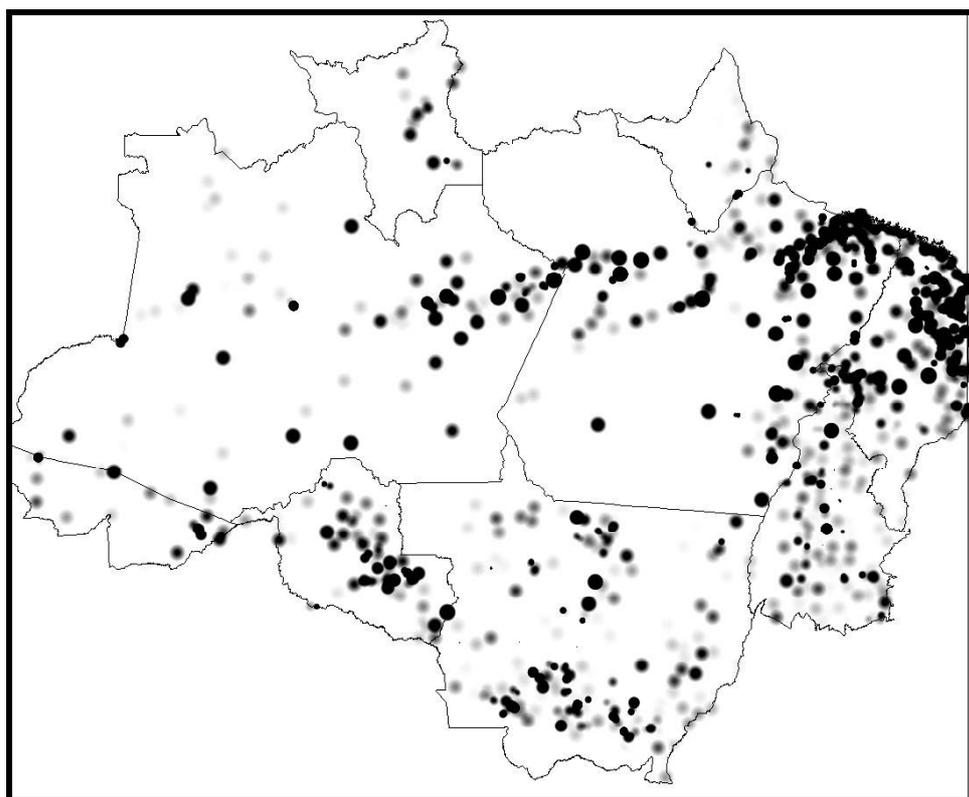


Figura 5.15 – Superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos distritos no censo 2000.

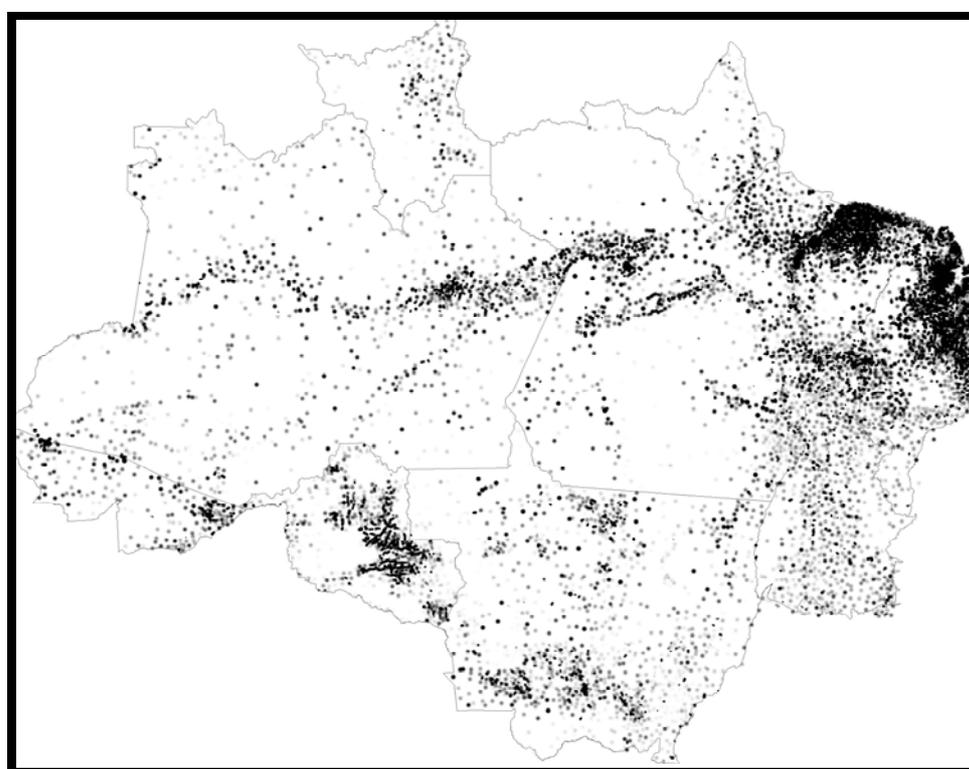


Figura 5.16 – Superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos setores censitários, censo 2000.

Para verificar o efeito do interpolador em escala maior e comparar com os outros métodos interpoladores, apresentam-se os mapas temáticos com as mesmas classes anteriormente definidas para o detalhe em Rondônia (Figura 5.17). Mesmo com o detalhamento dos setores censitários, não se obteve uma superfície com aspecto contínuo. O método não se aplica eficientemente para regiões onde as unidades são extensas, heterogêneas ou possuem regiões despovoadas como na Amazônia.

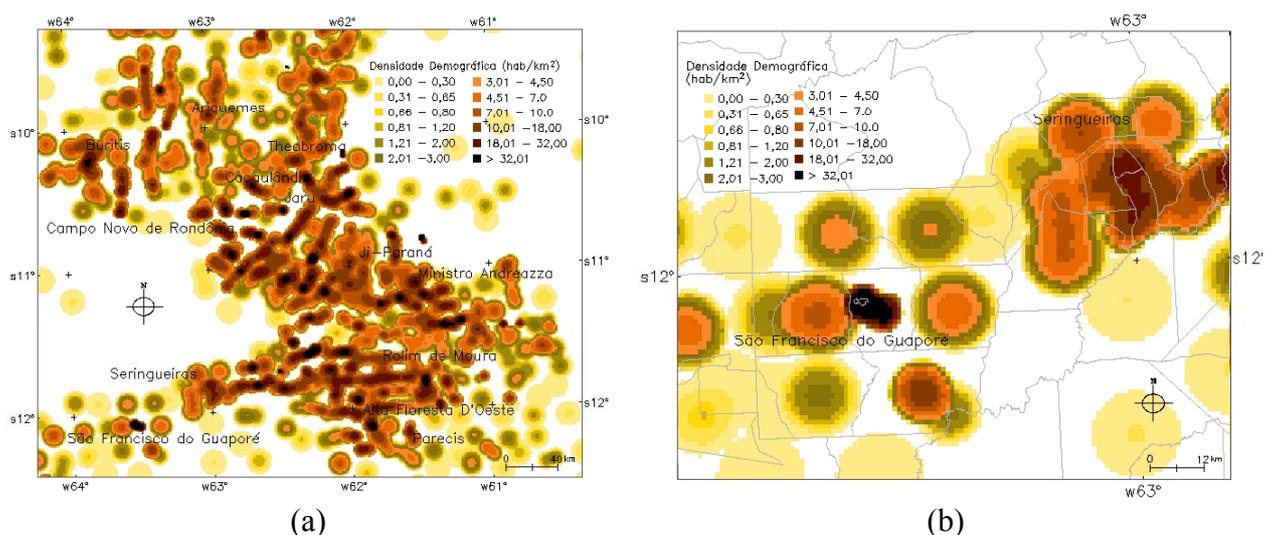


Figura 5.17 – Mapa temático da superfície de densidade populacional obtida pelo método dos centróides ponderados de Martin e população total dos setores censitários, censo 2000 para Rondônia (a) e São Francisco do Guaporé (b).

O efeito de concentração anteriormente observado para São Francisco do Guaporé através do método Picnofilático de Tobler (Figura 5.14) também ocorreu para o método dos centróides ponderados de Martin. O raio de busca de 10 km foi adequado para Seringueiras, caracterizada por setores menores e centróides conseqüentemente mais próximos. Entretanto, isto não ocorreu em São Francisco do Guaporé onde os setores são relativamente maiores. Não há um raio de busca que seja eficiente para captar a heterogeneidade de toda a região. Além disso, a presença de heterogeneidade dentro dos setores impede que o algoritmo represente corretamente a distribuição da população. Muitos setores censitários são delineados a partir de margens das vias de acesso. Por outro lado, a população normalmente encontra-se nas proximidades destas vias. O interpolador ao computar o centro geométrico do setor como posição de referência para atribuir a população cria concentrações de população deslocadas de suas posições reais. Este efeito ocorre, por exemplo, ao longo das espinhas-de-peixe (Figura 5.17a), onde o

interpolador capturou a concentração da população mas a representação espacial foi deslocada para o centro dos setores, o que nem sempre é real. Este efeito seria minimizado se a informação censitária incluísse a posição geográfica da concentração da população para cada setor.

A exemplo do obtido com o uso do interpolador de Tobler, o método dos centróides ponderados de Martin aplica-se a unidades de pequena extensão, densamente povoadas e homogêneas para gerar superfícies contínuas e de representação espacial correta.

### **5.3 Método multivariado *DMSPop\_M***

Conforme observado no capítulo anterior, o mosaico de luzes noturnas DMSP-2002 representou eficientemente a localização de todos os municípios com mais de 10.000 habitantes, 80% dos municípios entre 5.000 e 10.000 e 35% dos municípios com população urbana inferior a 5.000. A análise da área urbanizada descrita no capítulo 3 e as informações de campo também indicaram os relacionamentos entre a área iluminada nas imagens mosaico DMSP com a dimensão das manchas urbanas. Assim, propõe-se um método multivariado para representar a densidade populacional incluindo-se as informações do mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP denominado como *DMSPop\_M*.

Utilizou-se o mosaico DMSP-2002 e o posicionamento e dados censitários dos distritos referentes ao censo demográfico de 2000. Como muitos distritos não foram registrados no mosaico DMSP-2002, procedeu-se uma abordagem para os 576 distritos detectados, e outra diferenciada para os 470 distritos não detectados pelas luzes noturnas DMSP.

Para cada unidade de análise DMSP (UaDMSP - área de 4 km de influência a partir dos *pixels* de luzes noturnas) e a soma dos *pixels* de luzes noturnas com nível digital maior que 30 (ou 30%) e soma da população urbana dos distritos contidos na unidade foram calculados. Assumiu-se que a área urbanizada equivalia à área de luzes noturnas para calcular assim a densidade de população urbana para cada unidade de análise. Para as regiões compreendendo as capitais como Belém e Manaus (Figura 5.18), o cálculo da densidade demográfica foi feito para os limites das luzes noturnas e não para a as

unidades de análise. Isto evitou que os distritos menos populosos tivessem densidade populacional influenciada pelos núcleos mais populosos.

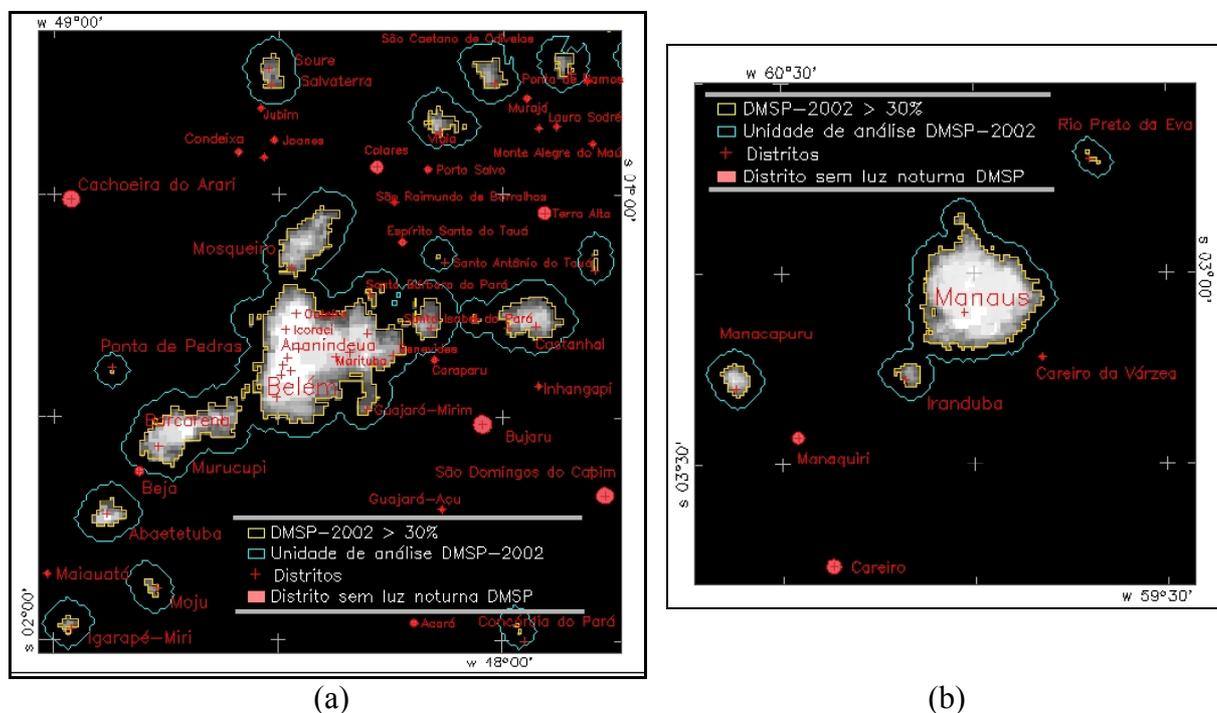


Figura 5.18 – Limites da classificação dos níveis digitais maiores que 30 (amarelo); limites das unidades de análise DMSP (azul) e limites dos distritos que não tiveram luzes noturnas detectadas (vermelho), sobre o mosaico DMSP-2002. Detalhes para a região de Belém (a) e Manaus (b).

Para os distritos que não tiveram suas luzes detectadas no mosaico DMSP-2002, o cálculo da densidade urbana tomou como referência os valores médios de densidade populacional por classe de população urbana obtidos para os distritos que tiveram sua área urbana estimada pelas luzes. Para os distritos com população urbana inferior a 500 habitantes foi atribuída área igual a 1 km<sup>2</sup> (resolução da grade de saída). Uma vez calculada a densidade demográfica urbana para todos os distritos, procedeu-se a espacialização destes valores. Os valores de densidade demográfica urbana foram então representados em uma grade regular de 1 km de resolução espacial. Os limites das manchas urbanas corresponderam aos limites dos focos de luzes estáveis no mosaico DMSP-2002 com valores de nível digital maiores que 30, para os distritos que tiveram luzes registradas. Para os distritos que não tiveram registro de luzes noturnas, o valor de densidade demográfica foi representado obedecendo ao limite dos círculos concêntricos à posição geográfica do distrito.

Observa-se na Figura 5.18 a validade de se utilizar a unidade de análise DMSP como referência para o cálculo de área urbana. Para cada UaDMSP calculou-se a soma dos *pixels* DMSP-2002 e a soma da população urbana de todos os distritos internos aos limites das unidades de análise. Esta generalização garantiu que pequenos focos de luz com distritos próximos mas não exatamente sobrepostos fossem computados. Fato verificado em Ponta de Pedras, Santo Antônio do Tauá, Concórdia do Pará e São Francisco do Pará na região de Belém (Figura 5.18a). Adicionalmente, ilustra a importância de não usar a unidade de análise para as capitais. Iranduba, por exemplo, iria receber valores de densidade demográfica que computariam também a população de Manaus (Figura 5.18b). O mesmo aconteceria para Mosqueiro, Santa Bárbara do Pará, Santa Isabel do Pará e Castanhal em relação à população da unidade de análise em que se encontram receberiam densidade demográfica influenciada pela população de toda região metropolitana de Belém.

Para os distritos não representados no mosaico DMSP-2002, a área calculada a partir de suas populações urbanas foi representada em círculos descritos a partir da coordenada geográfica do distrito e do raio proporcional a estas áreas.

Finalmente, os vetores que descrevem as áreas urbanas dos distritos, seja através das áreas de luzes noturnas ou dos círculos de área estimada, foram usados para gerar uma grade regular de 1 km<sup>2</sup> representando o valor da densidade demográfica urbana.

A vantagem de usar o mosaico DMSP como referência consiste na estimativa do valor da área urbana e a localização/distribuição desta área. Nesta região é comum a cidade se dispersar ao longo de eixos como rodovias ou seguir margens de rios. Desta forma, os círculos concêntricos são uma simplificação nem sempre condizente com a realidade especialmente para municípios com extensa área urbana. Quando comparada a uma representação de população urbana gerada a partir de uma interpolação com uso de *kernel*, a dispersão dos valores é concêntrica gerando diferenças entre o traçado da mancha urbana e o resultante da interpolação (Figura 5.19).

Analogamente à população urbana, as estimativas de área rural foram utilizadas para gerar uma representação para a densidade de população rural. As áreas urbanas computadas a partir das luzes noturnas DMSP-2002 das áreas circulares foram

subtraídas das áreas totais dos polígonos da malha municipal de 1997. A densidade de população rural foi então calculada, com os valores de população para os municípios do censo 2000.

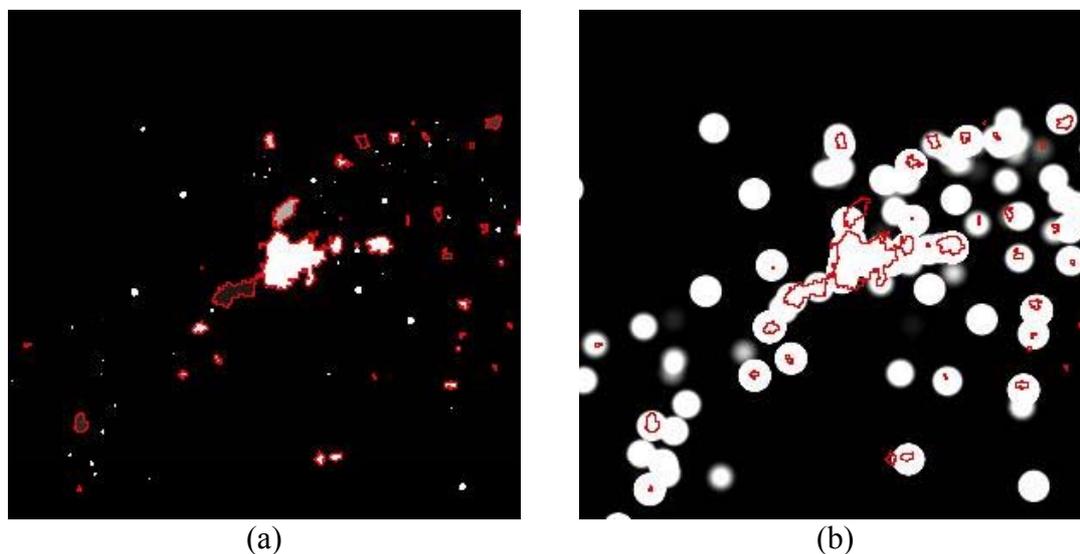


Figura 5.19 – Representações de densidade de população urbana dos distritos baseado no mosaico DMSP (a) e na interpolação por *kernel*(b).

Uma representação da distribuição da densidade populacional foi composta representando-se a densidade urbana e densidade rural numa grade única. Para efeito de modelagem, a grade gerada reflete a população em cada célula permitindo agrupamento para qualquer resolução superior a  $1 \text{ km}^2$ . Ou seja, pode-se calcular a densidade de população diretamente sobre esta grade para outro nível de agregação em células ou regiões.

Desta forma, uma superfície que representa os valores de densidade populacional em células de  $1 \text{ km}^2$  foi construída tomando-se por base as informações de área urbanizada a partir do mosaico DMSP, e dados de população urbana (distritos) e rural (municípios) do censo 2000. O mapa temático referente a esta superfície expressando as densidades demográficas urbana e rural é apresentado na Figura 5.20. Os intervalos de densidade correspondem aos anteriormente definidos para as demais superfícies apresentadas. Esta superfície resulta do procedimento *DMSPop\_M*: além da informação da população por distritos, informações de luzes DMSP auxiliaram na distribuição da população nas células da grade.

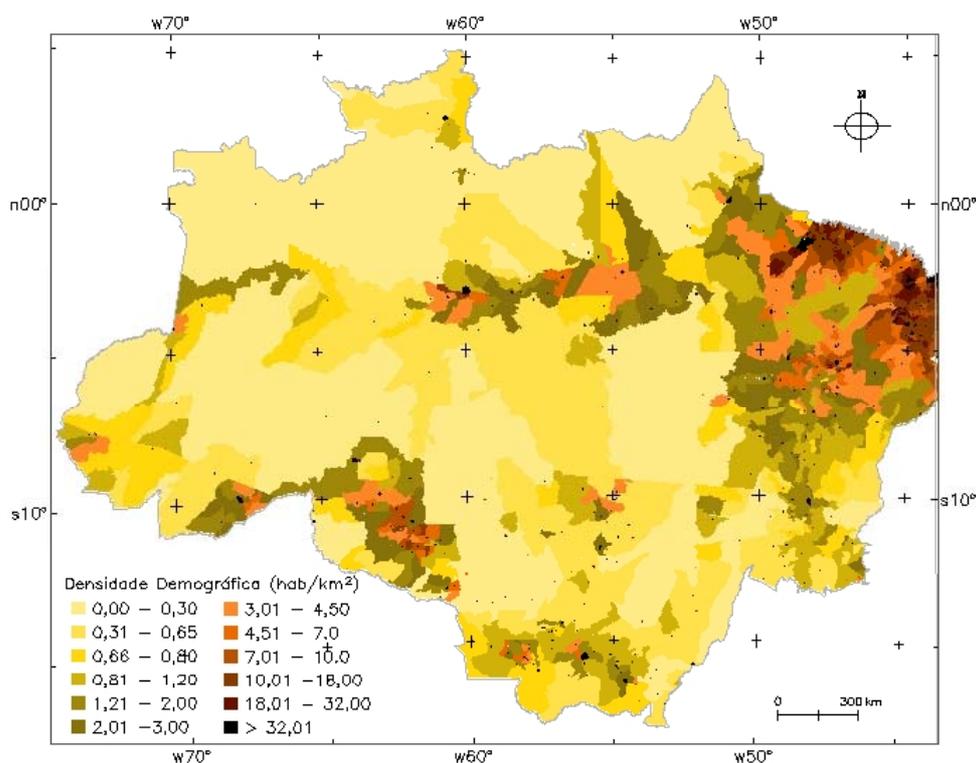


Figura 5.20 – Mapa temático da superfície de densidade populacional obtida pelo método *DMSPop\_M* e população dos distritos e municípios no censo 2000.

Quando comparada à representação da população através dos limites municipais (Figura 5.6), a superfície resultante do método *DMSPop\_M* apresentou um melhor detalhamento da distribuição populacional uma vez que fez a distinção entre as densidades de população urbana e rural. Por outro lado, aproximou-se da superfície de densidade demográfica que os setores censitários proporcionam (Figura 5.12) apresentando as principais diferenças onde a dimensão dos municípios é muito grande, principalmente no estado do Pará e Amazonas. A superfície de densidade resultante do método *DMSPop\_M* apresentou informações em uma escala intermediária entre as distribuições limitadas pelo recorte, incluindo-se a superfície gerada pelo método de Tobler e a superfície do setor censitário.

Tomando-se a superfície dos setores censitários ponderados pela área como referência (Figura 5.12), verificou-se a exatidão de mapeamento da superfície resultante do método *DMSPop\_M* a partir da comparação não dos números absolutos das superfícies mas quanto às classes de densidade definidas a partir das superfícies. A distribuição espacial dos “erros de classificação” pode ser observada na Figura 5.21. A maior parte

das diferenças por superestimativa, ou seja, regiões que na superfície resultante do método *DMSPop\_M* corresponderam a classes de densidade superiores às observadas na superfície dos setores censitários ocorreram nas áreas de densidade rural. Os erros de subestimativa encontraram-se principalmente ao longo da calha do Amazonas e de outros rios. Estes erros foram causados pela falta de detalhe espacial para captar as heterogeneidades nos municípios uma vez que, apenas a informação de luzes noturnas foi utilizada para desagregar a população.

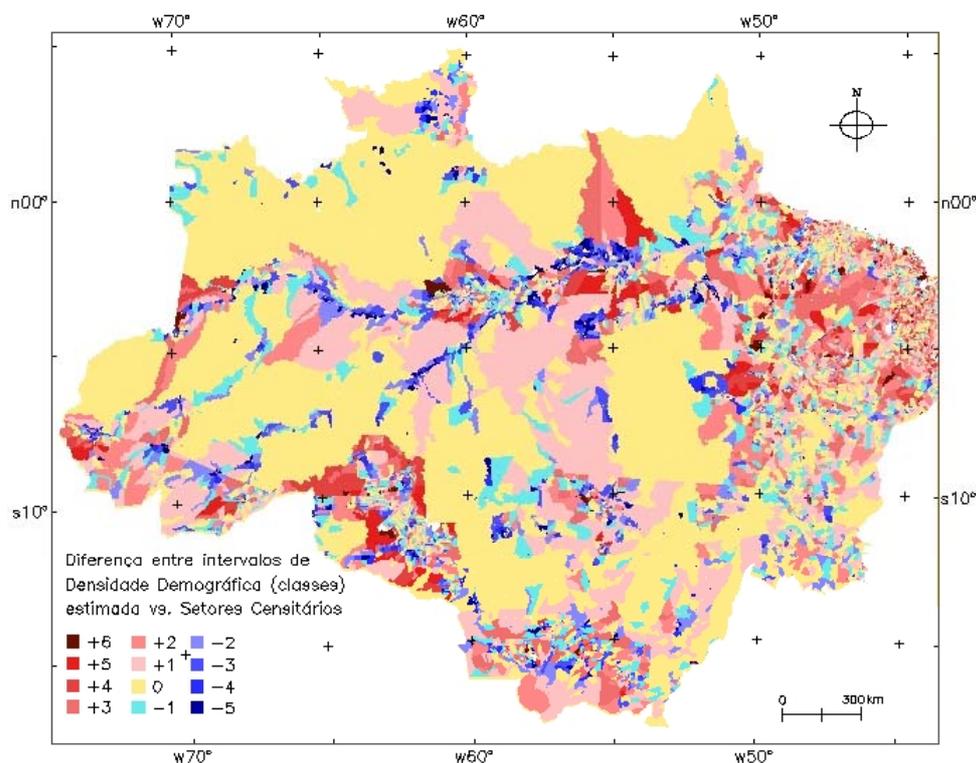


Figura 5.21 – Mapa temático das diferenças de classes entre a superfície de densidade populacional dos setores censitários e a superfície *DMSPop\_M*.

Um detalhe da distribuição dos erros pode ser observado na Figura 5.22, para o município Governador Jorge Teixeira (RO), o mesmo utilizado como exemplo de heterogeneidade dos setores censitários (Figura 5.1). O setor que compreende a sede de município obteve o menor erro entre as superfícies (classe +1). Em áreas de cobertura diferente de floresta houve subestimativa de densidade. Nas áreas de floresta, o erro foi de superestimativa. Isto ocorreu porque esta distinção de uso, visível na imagem TM-Landsat e presente no detalhe dos setores censitários, não foi representada na elaboração da superfície resultante do método *DMSPop\_M* baseada apenas no recorte do município e na presença de luzes noturnas.

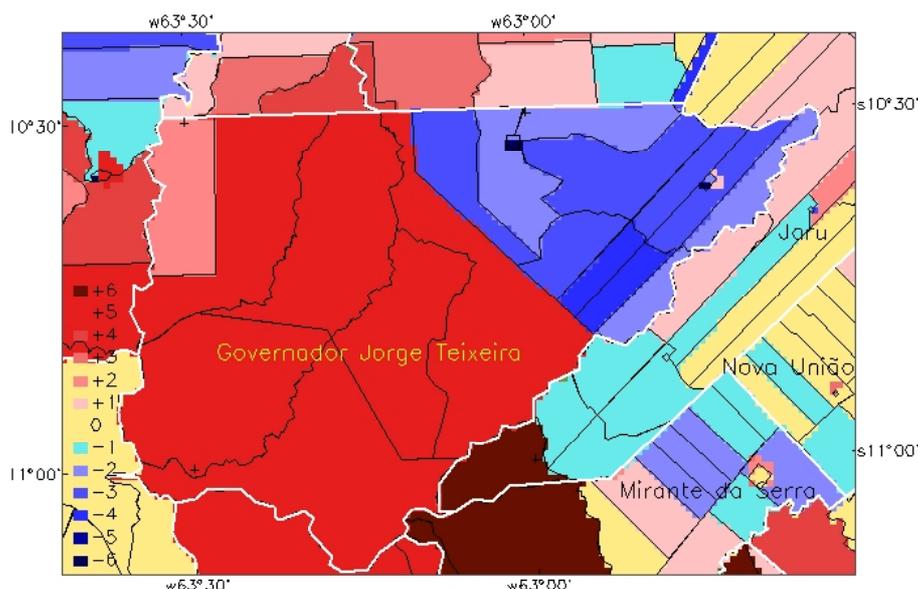


Figura 5.22 – Detalhe das diferenças entre superfícies de densidade populacional dos setores censitários e a superfície com informações de luzes noturnas DMSP.

A partir da matriz de confusão entre as superfícies de setores censitários, considerada de referência e a superfície resultante do método *DMSPop\_M* em avaliação, obteve-se 78,19% de exatidão global (percentagem de área classificada corretamente em relação ao total de área classificada). Adicionalmente, obteve-se um valor da estimativa Kappa (Congalton, *et al.*, 1983) igual a 0,64. Valores de Kappa próximos a 1 indicam boa concordância entre o mapeamento e a referência e valores próximos a 0 sugerem que o resultado é completamente “por acaso”. Como este índice mede a diferença entre a concordância do mapeamento com a referência e uma concordância que seria obtida se este ajuste fosse aleatório, pode-se afirmar que há uma concordância entre as superfícies consideradas.

O uso de informações adicionais às utilizadas para a superfície resultante do método *DMSPop\_M* poderia incorporar a heterogeneidade existente dentro do município e assim, distribuir mais corretamente a população. Informações como o tipo de cobertura do solo, especialmente para a região Amazônica de intensa cobertura florestal e atividade de desmatamento bem como, proximidade a vias de acesso e proximidade a outros centros seriam fundamentais para caracterizar a heterogeneidade dos municípios.

#### 5.4 Considerações do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados da aplicação de diferentes interpoladores espaciais para distribuir e representar os dados da população na Amazônia Legal Brasileira.

A interpolação dos pontos de população através da krigagem ordinária gerou superfícies imprecisas, sobre as quais não se pode obter o valor real de densidade. Isto ocorreu devido aos pontos terem sido interpolados para que toda a região recebesse um valor de densidade na grade de saída. Mas sendo esta uma restrição conhecida do método, a utilidade destas superfícies encontra-se na visualização de padrões globais, que permitiu avaliar as tendências gerais de distribuição e concentração da população na Amazônia. A análise da evolução das superfícies de 1991, 1996 e 2000 permitiu identificar os principais eixos de crescimento da densidade demográfica que descreveram a tendência espacial de ocupação da região Amazônica.

O método Picnofilático de Tobler se propõe a gerar superfícies contínuas reduzindo a presença de limites abruptos entre as unidades de área que definiram a coleta dos dados. Quando aplicado sobre os municípios da Amazônia Legal obteve-se o efeito de suavização de bordas esperado. Contudo, a dimensão dos municípios impede que apenas a continuidade entre os limites defina uma superfície suave. Aplicando o método para os setores censitários de menor dimensão espacial, esperava-se uma superfície contínua e correta no sentido que o volume seria preservado. Para limites entre setores de densidades discrepantes ocorreu um efeito de concentração de densidade no limite com o setor de alta densidade, em detrimento de valores de densidade muito baixos para localidades distantes desta fronteira. Como consequência, algumas áreas de muito baixas densidades foram geradas no entorno de setores muito densos. O resultado mostrou que apesar de coerente em termos de valores de densidade, a superfície gerada com o método de Tobler sobre os setores censitários terá bons resultados quando os setores forem relativamente similares quanto à densidade.

O emprego do interpolador baseado em *kernel*, conhecido como método dos centróides ponderados de Martin, gerou superfícies para os municípios e setores censitários preservando os espaços sem população e concentrando a população nos centros

geométricos das unidades. Analisando-se em detalhe os efeitos de concentração exagerada e desconcentração nos entornos, similares aos obtidos para o método de Tobler, também foram obtidos para o método de Martin. Aconselha-se o uso desta técnica para regiões que possuam densidade homogênea tanto dentro da unidade de análise quanto entre unidades contíguas. Ou ainda, para regiões onde haja centróides que indiquem os centros de massa do atributo estudado em cada unidade, ou seja, os locais de maior densidade na unidade de coleta de dados.

O método multivariado *DMSPop\_M* proposto gerou uma superfície de densidade de população precisa, no sentido em que medidas de densidade podem ser feitas diretamente sobre as células da grade. Por sua concepção, esta superfície apresentou detalhes no interior do limite municipal dependentes da resolução e sensibilidade do mosaico de luzes noturnas DMSP. A superfície resultante apresenta um nível de detalhamento intermediário entre a representação da população através das divisas municipais e dos setores censitários. Os valores de concordância entre as classes de densidade definidas pela superfície resultante do *DMSPop\_M* e aquelas definidas pelo mapa temático da densidade dos setores censitários justificaram a construção de superfícies multivariadas para monitoramento da distribuição populacional na Amazônia.

Conforme descrito anteriormente, não há um método de interpolar e representar dados da população em superfícies que permita capturar toda a heterogeneidade regional, realizar medidas de densidade precisas e ainda apresentar tendências, evolução ou padrões de distribuição na Amazônia. Cada método será aplicável de acordo com o objetivo e a unidade em que os dados foram coletados. Para atividades de modelagem, por exemplo, na ausência de informações de setores censitários, aconselha-se o uso de superfícies resultantes de métodos multivariados como a desenvolvida neste trabalho, cujo nível de precisão e detalhamento permitem inferência direta da distribuição da população.

Para escalas maiores, métodos multivariados poderiam ser desenvolvidos considerando um número maior de variáveis indicadoras da presença da população, incluindo-se dados de sensoriamento remoto.

## CAPÍTULO 6

### SUPERFÍCIE DE DENSIDADE DE POPULAÇÃO PARA OS SETORES CENSITÁRIOS DO MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA.

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos para a construção de uma superfície de densidade de população em escala municipal. Inicialmente o procedimento de desagregar a informação da população no interior dos limites dos setores censitários foi desenvolvido para uma região próxima à sede do município de Marabá, no estado do Pará, utilizando dados auxiliares e uma imagem do sistema CCD-CBERS1. Posteriormente, apresentam-se as superfícies resultantes da aplicação do método desenvolvido para todos os setores censitários do município de Marabá.

#### **6.1 O município de Marabá - PA**

O município de Marabá localiza-se no sudeste do estado do Pará (Figura 6.1). Por sua importância e influência regional, o município configura-se como uma capital regional, sendo citado popularmente como a futura capital do estado de Carajás. Com seus 15.111,26 km<sup>2</sup> de extensão, apresenta seu núcleo urbano na confluência dos rios Tocantins e Itacaiúnas e das estradas Transamazônica e PA-150. O município foi exemplo da intensa mobilidade humana da década de 80, e ainda hoje representa processos de mobilidade rural-urbana e ocupação de terras apesar de ser considerada uma região onde a fronteira encontra-se consolidada. Adicionalmente, foi uma das regiões para a qual se verificou mais de um foco de luz noturna na imagem DMSP-OLS. Por ser uma das áreas de interesse da rede temática GEOMA (Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental para a Amazônia) do Ministério da Ciência e Tecnologia, o que incluía a possibilidade de trabalho de campo, foi selecionada como área piloto. Apresenta-se a seguir uma breve descrição do processo histórico de ocupação do município.

Na década de 60, a implantação dos eixos viários leste-oeste (Transamazônica) e norte-sul (PA-070, atual BR-222 e PA-150), propiciou mudanças radicais na estrutura econômica, política e social na região de Marabá. A abertura da fronteira agrícola

ocorreu com o extrativismo vegetal sendo substituído progressivamente por atividades de agricultura e pecuária associadas ao extrativismo vegetal comercial e posteriormente, por atividade de mineração (Emmi, 1989; Hebette, 1992).

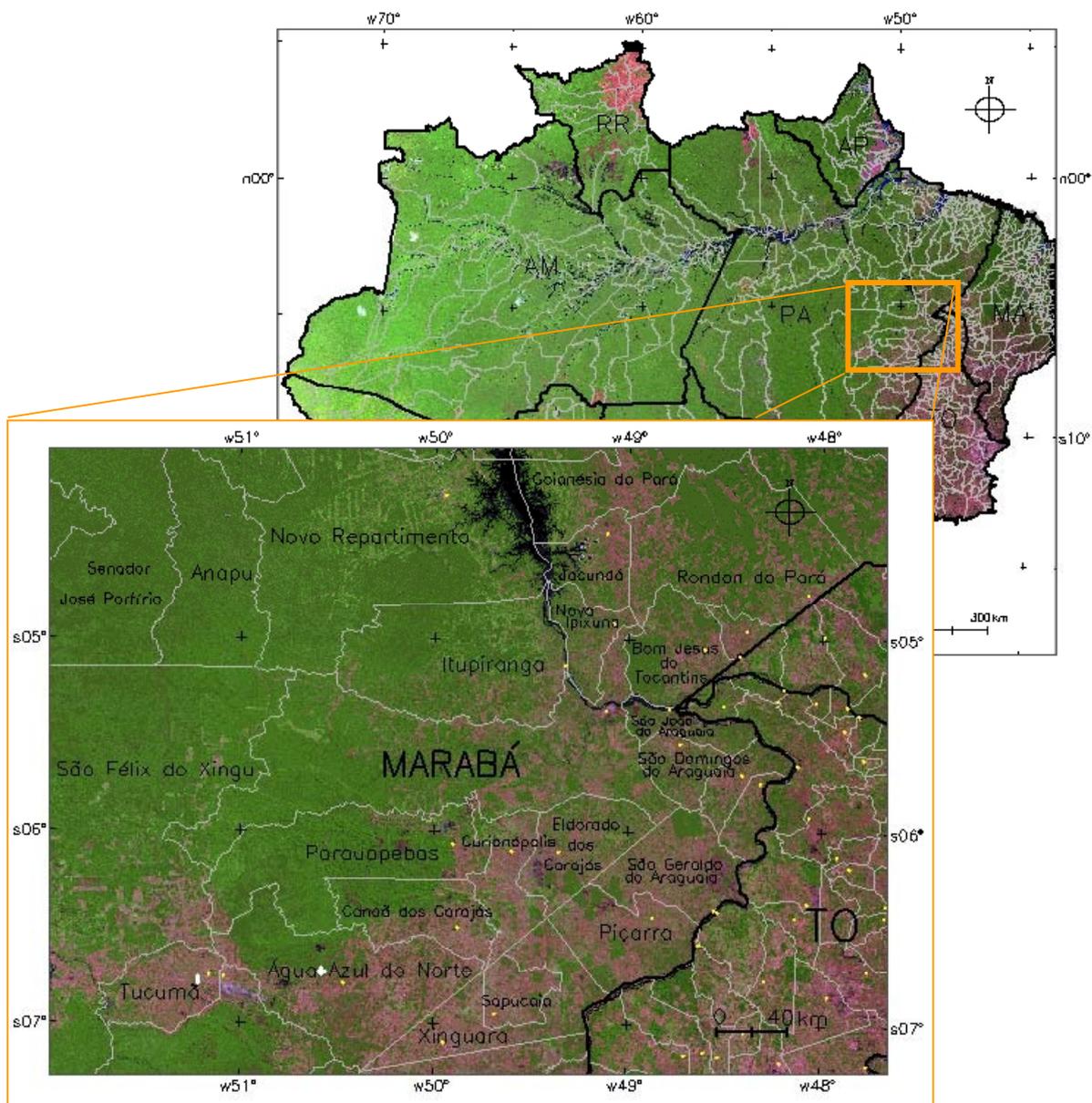


Figura 6.1 – Localização de Marabá no estado do Pará.

Os fluxos migratórios aumentaram a diversidade da composição da sociedade local, em duas grandes frentes de penetração. A primeira, na década de 60, caracterizou-se pelo fluxo leste-oeste proveniente do Maranhão. A segunda, no decorrer da década de 70 trouxe do sul migrantes principalmente baianos, mineiros e capixabas de tradição no trato com o gado (De Reynal, *et al.*, 1995). A década de 80 foi caracterizada pelo

aumento da densidade demográfica e pela alta rotatividade de pessoas em busca dos recursos minerais da região.

Passada a febre dos garimpos, a região de Marabá enfrentou problemas relacionados ao acesso a terra e ao crédito agrícola. Além de alterações na estrutura fundiária, na paisagem e na composição da sociedade, a presença de migrantes agravou a violência na disputa pela terra. Isto veio a fortalecer as estruturas organizativas da sociedade rural como os Sindicatos de Trabalhadores Rurais, Sindicatos dos Ruralistas, dos Madeireiros, entre outros. Desta organização resultaram avanços na questão da terra, como indicam a proliferação de Projetos de Assentamentos (PA) do INCRA de 130 PAs em 1996 para 276 PAs em 2000 para a região sul e sudeste do Pará, e a liberação até 2000 de aproximadamente 61 milhões de reais de crédito agrícola somente para instalação de pequenos agricultores (MDA, 2000).

Trabalhos recentes na região de Marabá indicam que comparativamente aos períodos anteriores, o fluxo de entrada e saída de famílias tem se mostrado mais lento com uma tendência de permanência das famílias nos assentamentos (Oliveira *et al.*, 2001). O estudo dos fluxos de famílias em 6 localidades destacou o movimento interno nos municípios: entre as sedes de localidades e a área rural, ou mesmo entre diferentes regiões na zona rural. Regiões mais antigas, com melhor infra-estrutura e próximas a centros urbanos são atratoras de fluxo. Movimentos de entrada de famílias de outros estados são observados em áreas com presença de mata por intermédio de parentes.

Dentre os movimentos de saída destacam-se em números inferiores aos de entrada, o destino para outros estados e a troca de lotes dentro do mesmo município e dentro da mesma localidade. A infra-estrutura é apontada como o principal fator para a saída das famílias, expressa pela ausência de escola, más condições de manutenção das estradas e pela política agrícola vigente que dificultam o acesso ao crédito e assistência técnica. Enquanto o índice de saída (IS) de famílias observado em regiões de fronteira são de 60 a 80%, para a região de Marabá o índice de saída não ultrapassou a 3% indicando uma dinâmica diferente da estratégia da fronteira. Há indícios que a fronteira estaria se deslocando para oeste em direção a Novo Repartimento (Oliveira *et al.*, 2001).

## 6.2 Proposta metodológica

Para gerar uma superfície de densidade populacional para o município de Marabá um procedimento híbrido dos métodos dasimétrico e multivariável com atribuição de pesos para variáveis indicadoras foi desenvolvido. O objetivo foi desagregar os valores de população atribuídos aos limites dos setores censitários, redistribuindo-os em células de 1 km x 1 km. A necessidade de se detalhar a representação da população a partir dos setores censitários advém da heterogeneidade, tanto em relação à área dos 39 setores, variando de 1,17 km<sup>2</sup> a 1955,21 km<sup>2</sup> (com média de 387,47 km<sup>2</sup>), quanto à presença e intensidade da atividade humana observável no mosaico de classes de cobertura da terra.

Desta forma, a resolução espacial da superfície de saída deveria ser de uma magnitude tal que detectasse a menor unidade de coleta de dados (setor censitário) e permitisse a análise na escala da Amazônia Legal, da ordem de 1:1.000.000 (escala de visualização possível compreendendo todo o município em tela), com erro de mapeamento permitido de 500 m. Considerando-se ainda que o detalhamento possível com imagens do sistema CCD-CBERS1 é de 20 m e com imagens do sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) do Landsat7 é de 30 m, definiu-se a grade de 1 km x 1 km como um compromisso adequado entre a base de dados e a superfície desejada. Assim, uma grade foi estruturada através de células de 1 km x 1 km de resolução espacial para o município de Marabá. Cada célula da grade correspondeu a um registro, contendo atributos não espaciais associados a tabelas no banco de dados em um sistema de informação geográfica. Apenas as células completamente contidas no limite do município (área igual a 1km<sup>2</sup>) foram consideradas válidas. Todo cálculo para a geração da superfície de densidade populacional utilizou as células como unidade de análise.

Para gerar a superfície de densidade de população distribuindo-se o valor de contagem da população criteriosamente dentro do setor censitário, considerou-se que:

- 1) não há população associada às áreas de corpos d'água e de floresta;
- 2) há variáveis que indicam a presença ou ausência de população no espaço e que podem ser usadas para sugerir a ocorrência e distribuição da população;

- 3) a relação entre estas variáveis indicadoras gera uma superfície potencial de ocorrência de população que permite a redistribuição dos valores censitários.

Assim, desenvolveu-se um método híbrido composto de três etapas básicas: (i) através de um método dasimétrico, eliminou-se as áreas de floresta e corpos d'água, para as quais não haveria habitantes; (ii) informações adicionais indicadoras de presença humana foram usadas para gerar uma superfície de ocorrência potencial de população (superfície adjacente), com uso de inferência *Fuzzy* (Zadeh, 1965) e método de interpolação multivariado; (iii) redistribuiu-se os valores de contagem populacional do setor censitário em cada célula proporcionalmente a um potencial de ocorrência de população definido pelas variáveis indicadoras. Desta forma, a densidade de população inicialmente representada nos limites dos setores censitários (poligonais), foi redistribuída em células de acordo com as relações definidas entre as variáveis indicadoras da presença da população (Figura 6.2).

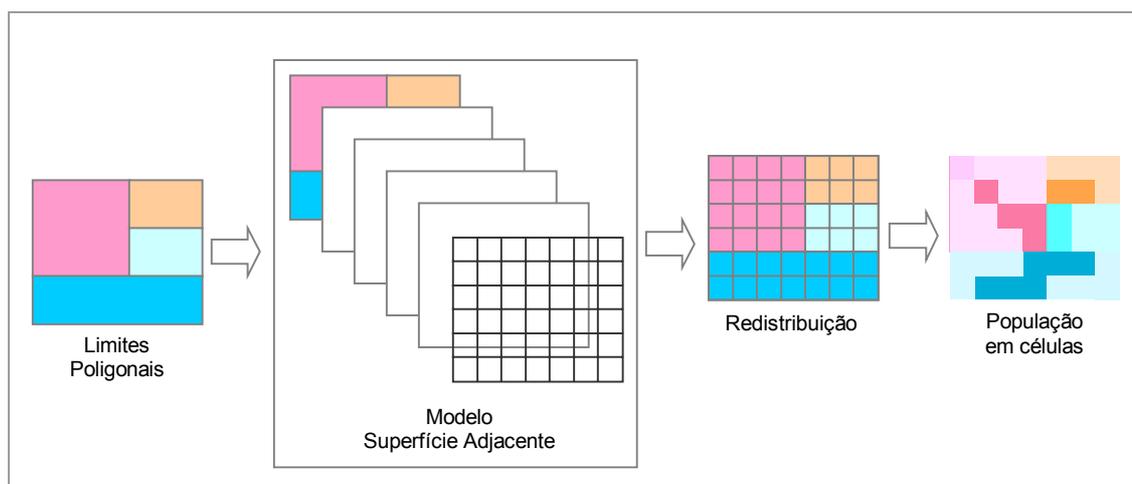


Figura 6.2 – Representação esquemática do procedimento para redistribuição da população nos setores censitários.

Ressalta-se que a metodologia foi desenvolvida inicialmente para uma sub-região de Marabá e posteriormente, estendida para todo o município.

### 6.2.1 Método dasimétrico – restrição a áreas não habitadas

O objetivo desta fase foi identificar inicialmente as células onde não haveria possibilidade de ocorrência de população, basicamente os corpos d'água e áreas de

floresta densa, o que se alcançou com o uso de um método dasimétrico baseado em imagens de satélite.

Para o desenvolvimento da metodologia utilizou-se uma imagem do satélite CBERS1 (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), sensor CCD (Câmara Imageadora de Alta Resolução), órbita-ponto 161/106, de 12/08/2002, nas bandas 1 (0,45 - 0,52  $\mu\text{m}$ ), 2 (0,52 - 0,59  $\mu\text{m}$ ), 3 (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ), e 4 (0,77 - 0,89  $\mu\text{m}$ ) de 20 m de resolução espacial e 113 km de faixa de imageamento. A imagem foi registrada tomando-se como referência os vetores dos limites dos setores censitários, com erro de aproximadamente 1,5 *pixel* (30 m) para um polinômio de primeiro grau, utilizando-se o interpolador bilinear para reamostrá-la para a projeção UTM/SAD-69 (Universal Transversa de Mercator, South America Datum – 1969).

Como o objetivo não era o mapeamento das classes de cobertura do solo, mas sim a detecção das regiões potencialmente inabitadas, técnicas não sofisticadas de classificação digital de imagens foram empregadas sobre as bandas CCD-CBERS1. Basicamente, foram aplicados limiares sobre os níveis digitais (ND) das bandas para definir as classes de interesse. A banda 4 (infravermelho próximo) possibilitou a detecção de corpos d'água e a banda 3 (vermelho) identificou as ilhas arenosas. Para identificar as regiões de floresta densa foi definido um limiar sobre o histograma da razão de bandas conhecida como índice de vegetação de diferença normalizada, a partir das bandas 4 e 3. A Tabela 6.1 apresenta os valores de níveis digitais e as classes definidas.

TABELA 6.1 – Limiares para detecção de classes nas bandas CCD-CBERS1.

| <b>Classe</b>  | <b>Banda Espectral</b>                                       | <b>Limiar</b> |
|----------------|--|---------------|
| Corpos D'água  | Banda 4 – Infravermelho Próximo (0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ ) | ND < 118      |
| Ilhas arenosas | Banda 3 – Vermelho (0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ )              | ND > 200      |
| Floresta       | Razão = (Banda4 – Banda3)/(Banda4 + Banda3)                  | ND > 107      |

Com a classificação das áreas de floresta, corpos d'água e ilhas arenosas, verificou-se em quais células da grade a somatória destas áreas classificadas atingiram 95% da área da célula. Estas células então receberam um valor de potencial de ocorrência de população igual a zero e foram excluídas do cálculo de densidade demográfica do setor

censitário. A classificação da imagem foi o primeiro critério para distribuir a população eliminando células com nenhum valor potencial de população associado.

A ausência de imagens CCD-CBERS1 livres de cobertura de nuvens para a região de Marabá impossibilitou o uso destas imagens para distribuir a população de todos os setores censitários do município. Assim, imagens do sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat 7 foi a alternativa adotada. Com resolução espacial (30 m) menos detalhada que a imagem CCD-CBERS1 (20 m) e faixa de imageamento maior (180 km), apenas 2 imagens foram suficientes para compreender todo o município, correspondentes as órbita-ponto WRS 224/64 (22/08/2002) e WRS 224/65 (13/08/2002) respectivamente. Similarmente ao realizado para a imagem CCD-CBERS1, as imagens foram registradas tomando-se como referência os vetores dos limites dos setores censitários. Obteve-se erro de posicionamento de aproximadamente 1 *pixel* (30 m) e então as imagens foram mosaicadas com o uso do interpolador bilinear para compreender todo o município na projeção UTM/SAD69.

### **6.2.2 Método multivariado para uma superfície potencial de população**

Conforme descrito por Goodchild *et al.* (1993), para se obter uma superfície de densidade populacional é necessário inferir uma superfície adjacente relacionada à distribuição da população. O método multivariado constitui uma primeira tentativa para criar um modelo de redistribuição da população através da definição de uma superfície adjacente que captura a heterogeneidade espacial da unidade de coleta original dos dados. Para cada etapa ilustrada na Figura 6.3, diferentes soluções podem ser propostas. Neste trabalho, na inexistência de um modelo conceitual formal que descrevesse os fatores condicionantes da presença da população na região, adotou-se critérios baseados na literatura e observações de campo, bem como, relações matemáticas entre as variáveis preditoras. Cada uma das etapas e as respectivas soluções adotadas são descritas a seguir.

Inicialmente, para gerar superfícies de densidade através de métodos multivariados foi preciso selecionar as variáveis indicadoras, definir as contribuições relativas de cada variável e determinar a relação entre elas. Diferentes fatores podem condicionar a presença da população humana, tais como o processo histórico, a facilidade de acesso, a

disponibilidade de recursos e infra-estrutura, as características físicas do meio, entre outros. A importância relativa destes fatores também varia em função das particularidades locais. Identificar estes fatores e dimensionar a contribuição relativa de cada um deles é fundamental para indicar corretamente a distribuição da população.

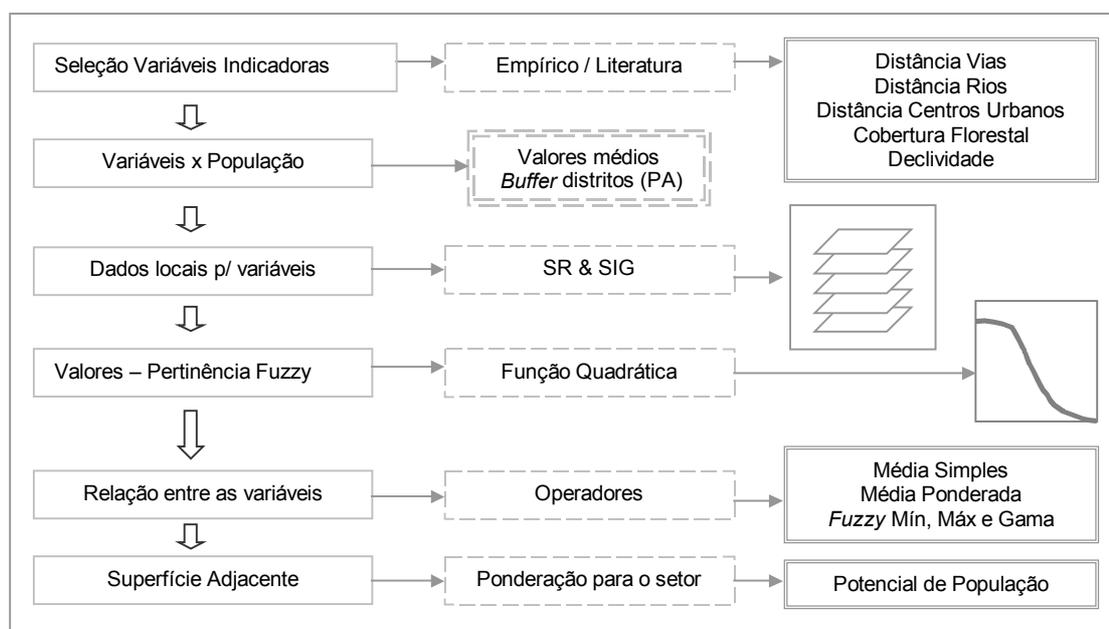


Figura 6.3 – Etapas do método multivariável proposto.

Para o modelo de distribuição da população proposto pelo projeto Landscan, por exemplo, quatro variáveis indicadoras de distribuição populacional foram identificadas: classes de cobertura da terra, distância a estradas, classes de declividade e presença de luzes noturnas DMSP/OLS (Badhuri *et al.*, 2002). Para o projeto Medalus foram consideradas como preditoras de população: a localização de parques, a distância das estradas principais, a densidade de vias expressas, de estradas principais e de estradas secundárias, a distância a rios, a localização de áreas urbanas, a distância a áreas urbanas pequenas, de porte médio, de grande porte e metrópoles, a densidade de áreas urbanas, a altitude do modelo de elevação digital, a densidade populacional resultante da estimativa do método Picnofilático de Tobler, a densidade populacional resultante da estimativa do *Smart SIM*, e a população resultante da estimativa ponderada pela área (Turner e Openshaw, 2001).

Para a região Amazônica, a disponibilidade de acesso condicionou historicamente não apenas a ocupação humana, mas todo o processo de desenvolvimento regional. As

primeiras estradas juntamente com a construção de Brasília, durante o governo de Juscelino (1955-60), marcaram o início da intervenção do Estado na região através do Plano de Desenvolvimento Nacional (PDN). Quando surgiu a Operação Amazônia (1966) seguida em 1970 pelo Plano de Integração Nacional (PIN), as frentes migratórias e os grandes fazendeiros já estavam instalados ao longo da rodovia Belém-Brasília (1960), ocupando as terras há 10 anos (Machado, 1999). O estímulo para mobilizar capital e migrantes para as novas frentes de povoamento também decorreu de investimentos públicos em 12.000 km de estradas, 5.110 km de redes de comunicação, redes de distribuição de energia elétrica, construção de hidrelétricas e levantamento dos recursos naturais de 5 milhões de km<sup>2</sup> (aerofotogrametria e RADAM). Foram investidos 10 bilhões de dólares (1970) pelo governo federal e empréstimos de bancos internacionais.

Genericamente, a partir de 1960, a ocupação urbana se intensificou. A política de desenvolvimento da região expressa pelos projetos de colonização regional e investimentos em infra-estrutura desencadeou um processo intenso de ocupação com a chegada de imigrantes do nordeste e sul do Brasil. A disposição espacial do povoamento foi alterada pelos investimentos federais nas décadas que se seguiram. As estradas pioneiras passaram a ser atratoras dos fluxos migratórios dirigidos e espontâneos. À medida que as estradas pioneiras foram construídas em terra firme novas aglomerações foram surgindo, muitas já sob a forma de cidades. As aglomerações ribeirinhas foram marginalizadas, com exceção daquelas cortadas pelos novos eixos de circulação terrestre e as capitais foram revigoradas pelo influxo migratório. Espacialmente identificou-se a substituição do padrão dendrítico pelos eixos viários. Entre 1991 e 1996, os processos de urbanização e desconcentração se acentuaram com o surgimento de novos municípios (Constituição de 1988) e com o crescimento da população em núcleos urbanos de 20.000 habitantes. Como resultado, obteve-se a concentração dos núcleos urbanos ao longo dos eixos fluvial e viário.

Outra evidência que relaciona a presença de estradas ao desenvolvimento na região Amazônica é a relação com as atividades de desmatamento. Para o período de 1991 a 1996, 17% do desmatamento detectado ocorreu a 50 km da malha viária oriental, incluindo a rodovia Cuiabá-Porto Velho –Rio Branco, 33% ocorreu a 50 km da malha

viária ocidental, ligando o Brasil central ao Pará e Maranhão e 24% a 50 km da malha viária central, incluindo a rodovia Cuiabá-Santarém, a Transamazônica e as rodovias do centro-norte do Mato Grosso (Alves, 1999). Apesar da atividade de desmatamento não ter relações diretas com a população total, pode-se considerá-la relacionada à presença humana, uma vez que mudanças de uso são estreitamente relacionadas ao número de pessoas novas chegando em áreas rurais (Wood e Skole, 1998). Este efeito decai com o aumento da densidade (raiz quadrada da densidade) de população rural. Têm-se assim, uma relação indireta entre rodovias e densidade demográfica, uma vez que a presença de estradas facilita o desmatamento que é dependente da densidade de população rural. A presença de estradas, mesmo que submetidas à manutenção precária e com o tráfego comprometido em época de chuvas, juntamente com a rede hidrográfica, com a presença de núcleos urbanos próximos e com atividades de desmatamento são fatores que indicam a presença humana na região Amazônica.

Desta forma, para um arcabouço teórico no estudo da distribuição da população em Marabá, as seguintes variáveis foram utilizadas como ponto de partida para gerar uma superfície de ocorrência potencial de população:

- Distância a vias;
- Distância a rios;
- Distância a núcleos urbanos;
- Percentagem de floresta;
- Declividade.

Estas variáveis foram selecionadas baseando-se na importância destes fatores para a atração e fixação de pessoas para a região, aliado a disponibilidade de dados. Durante o processo histórico de ocupação da região, o acesso foi um dos principais condicionantes: inicialmente pela presença de rios e mais recentemente pela presença de estradas. Paralelamente ao acesso, a proximidade de núcleos urbanos provedores de materiais e infra-estrutura, também tem facilitado a instalação de população e novos agrupamentos. Na impossibilidade de se gerar um mapa de uso da terra com precisão de mapeamento conhecida, a percentagem de floresta obtida pela classificação de imagem foi considerada como classe de uso também condicionante da presença

humana. E finalmente, a preferência pela instalação em locais de declividade suave, também foi considerada um fator condicionante de menor importância para a distribuição da população. Apresenta-se a seguir cada uma das variáveis e o procedimento adotado para torná-las variáveis preditoras da ocorrência de população.

### **Contribuição relativa das variáveis preditoras**

Para os setores censitários de Marabá, as variáveis preditoras foram utilizadas para gerar uma superfície de ocorrência potencial de população baseada na importância relativa de cada variável. Técnicas baseadas em lógica *Fuzzy* como alternativa para a definição de interpoladores inteligentes foram propostas por Turner e Openshaw (2001) ao avaliarem diferentes interpoladores espaciais para gerar superfícies de densidade populacional. As relações entre variáveis indicadoras e a densidade populacional podem ser traduzidas em funções de pertinência e inferência *Fuzzy* (Zadeh, 1988; An *et al.*, 1991).

Para tanto foi necessário quantificar as relações das variáveis preditoras com a ocorrência de população. Cada variável foi estudada particularmente, mas tomou-se como pressuposto geral que a ocorrência dos distritos no estado do Pará seriam evidências de presença humana traduzida em população. Assim, avaliou-se a relação entre cada uma das variáveis preditoras selecionadas: distância a vias, distância a rios, distância a centros urbanos e declividade para todos os distritos do estado do Pará. Estas relações serão num segundo momento utilizadas para atribuir um potencial de ocorrência de população dentro do setor censitário.

Desta forma, informações auxiliares foram incorporadas ao banco de dados para o estudo das variáveis e ocorrência da população. Para a variável distância a vias (*Dvias*) a malha viária disponível no Banco de Dados do Macrozoneamento Econômico Ecológico (MMA/SDS, 2002), foi referência para uma grade regular de 500 m de resolução espacial, com as respectivas distâncias a vias. Para a variável distância a rios (*Drrios*) as linhas de hidrografia fornecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foram referência para a grade regular contendo a distância a rios. Da mesma forma, para a variável distância a centros urbanos (*Durb*), a localização dos distritos (IBGE) deu origem a uma grade de distância a núcleos urbanos. Para a variável declividade (*Decl*), a grade com valores de declividade em porcentagem foi calculada

diretamente a partir da grade de altimetria (GTOPO<sup>5</sup>), também disponível no referido Banco de Dados. Todas estas grades referem-se aos limites do estado do Pará.

Ainda para esta análise das variáveis indicadoras, todos os distritos do estado do Pará foram utilizados como referência dos processos. Para cada um dos distritos foi gerada uma área de influência de 2 km a partir da coordenada geográfica central de referência IBGE, criando-se polígonos (círculos) de 12 km<sup>2</sup>. Cada distrito então correspondeu a um registro no banco de dados para o qual foram computados os valores de média de distância a vias, média de declividade e média de distância a rios extraídos das respectivas grades regulares. Estes valores orientaram a escolha dos limiares para atribuir os valores de pertinência *Fuzzy*. Foram ajustadas funções quadráticas para cada uma das variáveis, com valores de *alfa* e *beta* obtidos da análise das variáveis apresentada a seguir.

### Distância a vias

Observando-se a distribuição dos valores de distância às vias e a área de influência gerada para os distritos do Pará, obteve-se 90% dos distritos situados a menos de 127 km de distância às vias e 50% deles a menos de 27,5 km (Figura 6.4).

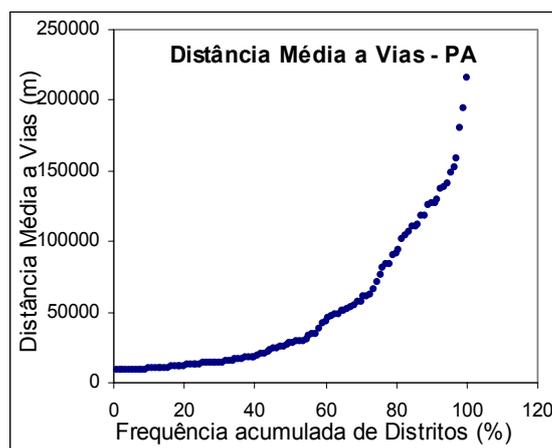


Figura 6.4 - Distância média a vias para as áreas de influência dos distritos do Pará.

<sup>5</sup> GTOPO é um modelo digital de elevação global compilado pelo Instituto Geológico dos Estados Unidos (USGS) com aproximadamente 1 km de resolução espacial. Este dado encontra-se disponível na internet <<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>>

### Distância a rios

O cálculo da média das distâncias aos rios para as áreas de influência dos distritos do Pará indicou que 90% dos distritos encontram-se a mais de 17 km de rios, 50% deles estão a menos de 3,5 km e a média geral de distância encontrada foi de 6,81 km. A Figura 6.5 apresenta a distribuição de frequência dos valores médios de distância a rios.

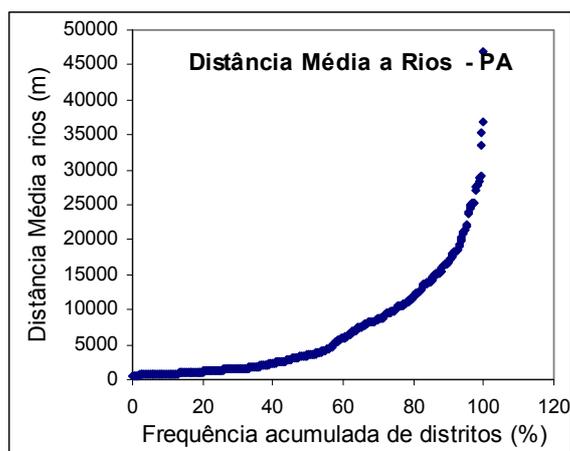


Figura 6.5 - Distância média a rios para as áreas de influência dos distritos do Pará.

### Declividade

O projeto LandScan observou que a maior parte dos assentamentos humanos ocorre em terrenos de declividades suaves a terrenos planos. Em regiões montanhosas, as medidas relativas de declividade correspondem inversamente à densidade populacional. No Pará o relevo é bastante suave. Para os distritos foram computadas declividades médias entre 0 e 7,30% de declividade. Foram contabilizados 90% dos distritos com valores de declividade média abaixo de 2%, e 50% dos distritos com declividade média abaixo de 0,27% (Figura 6.6).

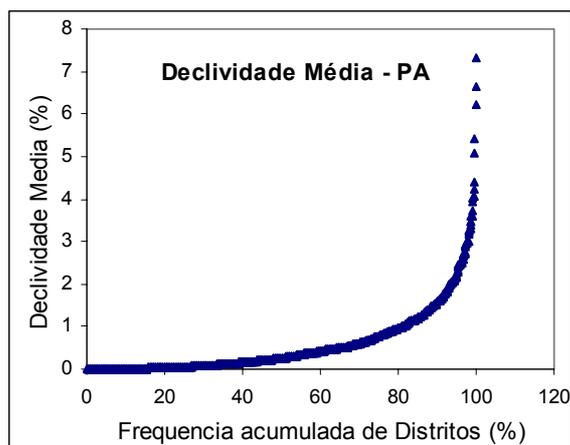


Figura 6.6 - Declividade média por área de influência dos distritos do Pará.

### Percentagem de Floresta

A relação entre percentagem de floresta e presença de população foi definida empiricamente tendo-se em conta que assentamentos e núcleos populacionais não são comumente verificados em regiões de densa cobertura florestal. Desta maneira, considerou-se que acima de 99% de cobertura florestal não há possibilidade de ocorrência de população e regiões com percentagem de cobertura florestal menor que 5% têm uma grande possibilidade de ter população associada. O limiar de 30% de cobertura florestal define regiões onde a ocorrência e não ocorrência potencial de população seriam iguais.

### Distância a centros urbanos

A distância a centros urbanos foi traduzida por distância aos distritos. Para definir como a distância a centros influencia a presença da população procedeu-se a análise de distância aos vizinhos mais próximos, considerando as localizações de todos os distritos no estado do Pará. A menor distância entre distritos foi de 1,5 km e a maior distância foi de 1.404,78 km. Em média, os distritos encontram-se 24,5 km distantes do distrito mais próximo.

Um resumo dos valores máximos, médios e mínimos que estariam correlacionando as variáveis predictoras com a presença de população é apresentado na Tabela 6.2. Estes valores foram utilizados para construir as funções de pertinência Fuzzy da mesma forma

apresentados na Tabela 6.2. A utilização de conjuntos Fuzzy para a caracterização de classes deve ser indicada sempre que se lidar com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (Burrough e McDonnell, 1998). Assim, para caracterizar formalmente um conjunto, pode-se recorrer ao conceito de função de pertinência: dado o valor de um atributo  $z$ , a função determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise.

TABELA 6.2– Parâmetros utilizados na definição das funções de pertinência *Fuzzy*.

| Variável                                       |    | Valores | f(z) | alfa      | beta |
|--|----|---------|------|-----------|------|
| Distância a vias (m)<br><i>Dvias</i>           | <= | 1000    | 1    | 1,48 E-09 | 1000 |
|  | =  | 27000   | 0,5  |           |      |
|  | >  | 40000   | 0    |           |      |
| Distância a rios (m)<br><i>Drios</i>           | <= | 1000    | 1    | 2,96 E-08 | 1000 |
|  | =  | 6810    | 0,5  |           |      |
|  | >  | 17000   | 0    |           |      |
| Distância a Setores Urbanos (m)<br><i>Durb</i> | <= | 1500    | 1    | 1,89 E-09 | 1500 |
|  | =  | 24500   | 0,5  |           |      |
|  | >  | 140000  | 0    |           |      |
| Floresta (% de área)<br><i>Pflor</i>           | <= | 0,05    | 1    | 16        | 0,05 |
|  | =  | 0,30    | 0,5  |           |      |
|  | >  | 0,95    | 0    |           |      |
| Declividade Média (%)<br><i>Decl</i>           | <= | 0,27    | 1    | 10,4058   | 0,27 |
|  | =  | 0,58    | 0,5  |           |      |
|  | >  | 3,5     | 0    |           |      |

Para atribuir os valores de pertinência Fuzzy neste trabalho definiu-se o uso de funções quadráticas para todas as variáveis. A função de pertinência quadrática foi estruturada da seguinte forma, tomando-se a distância a vias ( $z$ ) como exemplo:

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } (z > 40.000 \text{ m}) \\ 1/(1 + \alpha (z - \beta)^2) & \\ 1 & \text{se } (z \leq 1.000 \text{ m}) \end{cases} \quad (6.2)$$

O valor de *beta* ( $\beta$ ) corresponde ao valor da variável para quando a possibilidade de haver população associada é máxima, equivalente a um. O valor de *alfa* ( $\alpha$ ) é obtido a partir do valor da variável para a situação em que a ocorrência ou não ocorrência de

população teriam a mesma possibilidade de acontecer, ou seja, para quando o valor da função for igual a 0,5 dado pela equação:

$$\alpha = \frac{1}{(z - \beta)^2} \quad (6.1)$$

onde  $z$  é o valor da variável para quando  $f(z) = 0,5$ . Uma revisão teórica sobre técnicas de inferência espacial para relacionar variáveis pode ser encontrada em Moreira (2001).

A Figura 6.7 apresenta o aspecto da função de pertinência *Fuzzy* para cada uma das variáveis selecionadas.

### **Relação entre as variáveis preditoras**

A importância relativa de cada uma das variáveis indicadoras da presença de população é fundamental para elaborar uma superfície adjacente que define a possibilidade de ocorrência de população. Através desta superfície os valores de contagem populacional serão redistribuídos em células. No projeto LandScan, cada uma das variáveis recebeu um fator de ponderação para a integração de todas as variáveis, definindo-se um modelo de população. Contudo, esta atribuição de pesos não foi divulgada na literatura internacional. Para o projeto Medalus, a importância relativa de cada variável indicadora e o relacionamento entre elas foram obtidos empiricamente através de redes neurais. A partir de uma superfície resultante ideal definiram-se as relações entre as variáveis de entrada. Este tipo de procedimento “caixa-preta” não permite compreensão ou crítica das relações propostas pela rede antes da inferência.

Na ausência de um modelo conceitual robusto, ou de uma superfície padrão que pudesse ser utilizada para obter a relação entre as variáveis, as seguintes relações entre variáveis foram propostas: Média Simples das variáveis, os operadores *Fuzzy* Mínimo, *Fuzzy* Máximo e *Fuzzy* Gama e a Média Ponderada. Esta última teve a ponderação definida a partir da comparação pareada das evidências através de Análise Hierárquica de Processos (Saaty, 1978). A Tabela 6.3 apresenta as relações selecionadas. Apenas para a Média Ponderada houve uma escolha explícita da importância das variáveis, para a qual a distância a estradas foi considerada a variável mais importante seguida pela distância a

rios, distância a distritos, percentagem de floresta e por último na escala de importância, a declividade média.

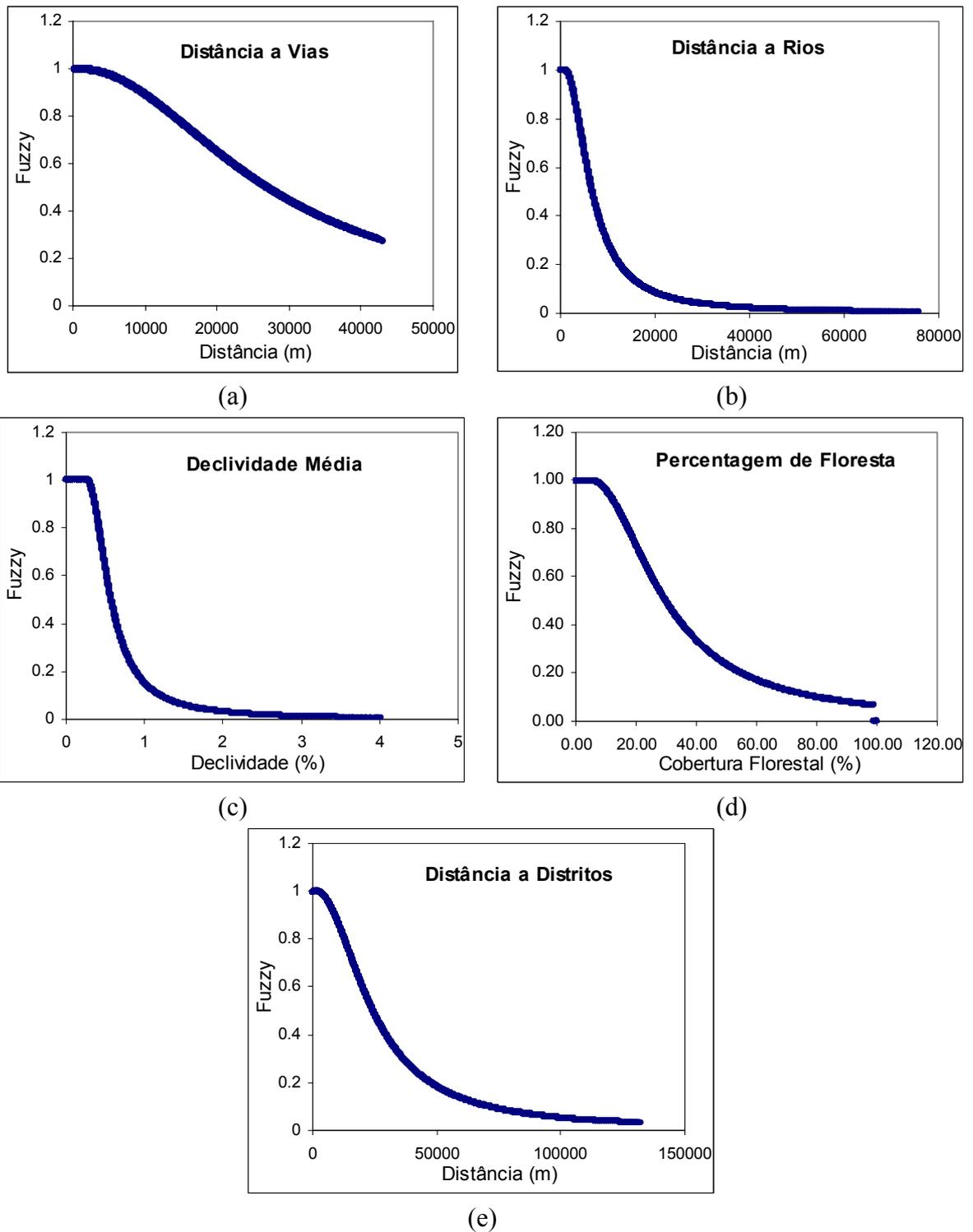


Figura 6.7 - Função de pertinência *Fuzzy* para a distância a vias (a), distância a rios (b), distância a centros urbanos (c), declividade média (d), e percentagem de floresta (e).

TABELA 6.3 – Operadores para relacionar as variáveis indicadoras.

| Operador        | Expressão   |
|-----------------|---|
| Média Simples   | $(Dvias + Drios + Decl + Durb + Pflor)/5$   |
| Fuzzy Mínimo    | Mínimo ( $Dvias, Drios, Decl, Durb, Pflor$ )  |
| Fuzzy Máximo    | Máximo ( $Dvias, Drios, Decl, Durb, Pflor$ )  |
| Fuzzy Gama      | $(1 - ((1 - Dvias)^* (1 - Drios)^* (1 - Decl)^* (1 - Durb)^* (1 - Pflor)))^{0,2} * (Dvias * Drios * Decl * Durb * Pflor)^{0,8}$ |
| Média Ponderada | $Dvias*0,589 + Drios*0,161 + Durb*0,099 + Pflor*0,082 + Decl*0,032$ #   |

$Dvias$  = distância a vias;  $Drios$  = distância a rios;  $Decl$  = declividade média;  $Durb$  = distância a centros urbanos;  $Pflor$  = percentagem de florestas

# Razão de Consistência igual a 0,056

Estes valores foram então computados para todas as células válidas, ou seja, células com percentagem de área menor que 95% correspondente a floresta e corpos d'água, e que não se referiam a setores censitários urbanos. Desta forma, há um valor potencial da ocorrência de população para cada célula, baseado nas variáveis definidas e nas relações entre variáveis propostas. Como foram propostos 5 operadores para relacionar as variáveis, foram criados 5 superfícies com os potenciais respectivos.

### 6.2.3 Redistribuição da população nas células

A contagem de população total, contabilizada por setor censitário, foi redistribuída nas células da grade considerando-se as possibilidades de ocorrência de população sugeridas pelas variáveis indicadoras da seguinte forma:

$$DP_{grid} = P_{CS} * \left( \frac{F_{grid}}{\sum_{i=0}^j F_{grid}} \right) \quad (6.3)$$

onde  $DP_{grid}$  é a densidade demográfica da célula,  $P_{CS}$  é a população do setor censitário,  $F_{grid}$  é o valor *Fuzzy* de possibilidade de ocorrência de população para a célula ponderado pela somatória dos valores *Fuzzy* obtidos para o setor censitário e considerando-se apenas as células válidas, ou seja, com percentagem de floresta e corpos d'água maior que 95%.

Desta forma, para cada célula há cinco novos valores de densidade demográfica referentes às superfícies adjacentes obtidas a partir dos operadores média, *Fuzzy* Mínimo, *Fuzzy* Máximo, *Fuzzy* Gama e Média Ponderada. Deste modo, os valores de população dos setores censitários rurais foram realocados em células de 1 km<sup>2</sup> de acordo com as informações provenientes das variáveis indicadoras de população selecionadas e das relações entre elas.

### 6.3 Resultados - superfícies de densidade de população para Marabá

A possibilidade de se classificar as áreas de floresta e superfícies de corpos d'água a partir da imagem CCD-CBERS1 (Figura 6.8) auxiliou a construção de superfícies de densidade de população para uma área inicial.

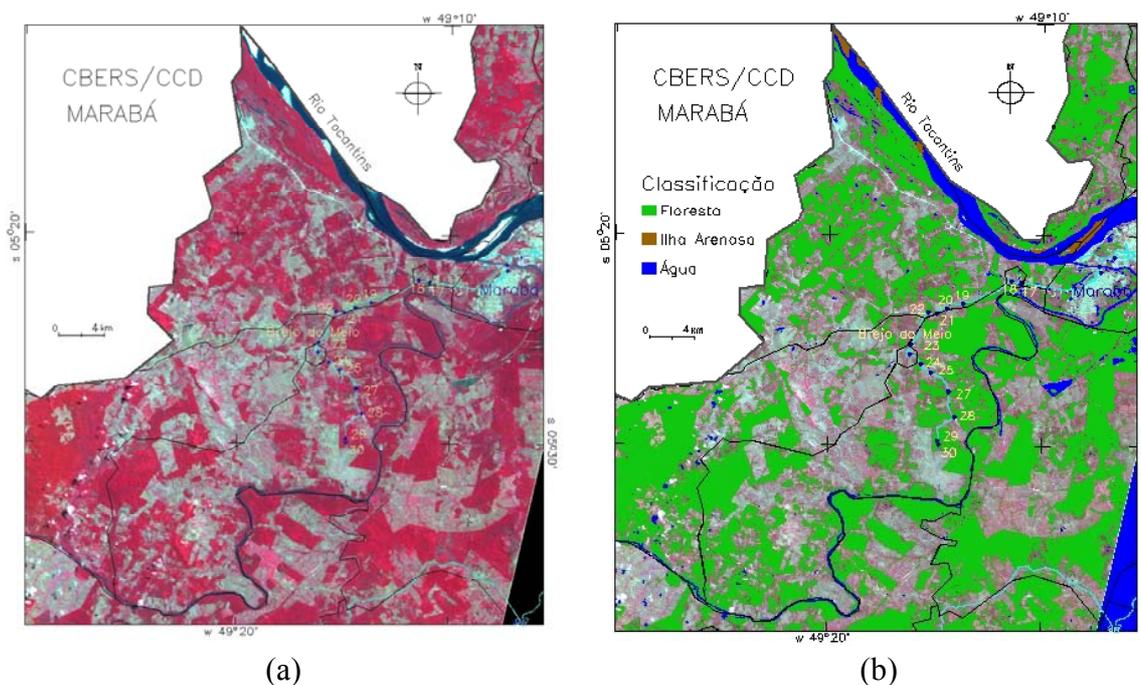


Figura 6.8 – Composição colorida de imagem CCD-CBERS1 – R4G3B2 (a), e classificação digital resultante de aplicação de limiares (b).

Selecionando-se a área da imagem CCD-CBERS1 livre de nuvens, na região do município de Marabá, foi possível construir superfícies de densidade de população para a região à oeste da sede do município. Esta região foi parcialmente visitada durante trabalho de campo realizado em maio de 2003. A Figura 6.9 apresenta as superfícies de densidade resultantes da aplicação dos operadores Média Simples, Média Ponderada,

*Fuzzy* Mínimo, e *Fuzzy* Máximo. A Figura 6.10 apresenta a superfície resultante do operador *Fuzzy* Gama.

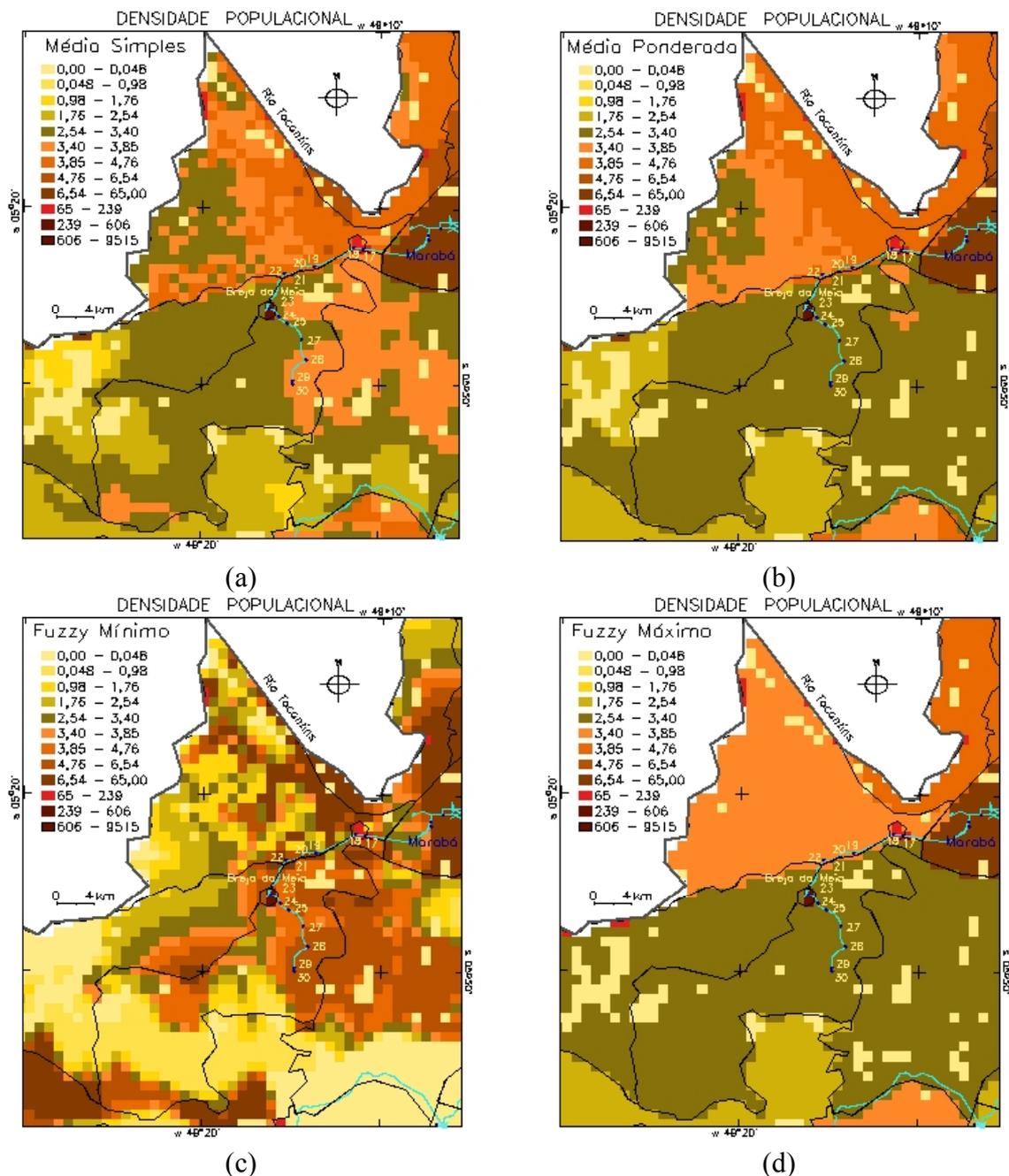


Figura 6.9 – Mapa temático da superfície de densidade de população obtidas pelos operadores: Média Simples (a), Média Ponderada (b), *Fuzzy* Mínimo (c) e *Fuzzy* Máximo (d) para a região a oeste da sede do município de Marabá.

O percurso do trabalho de campo encontra-se registrado nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10. A linha na cor azul corresponde à via percorrida e os pontos correspondem aos registros de GPS. Partindo-se de Marabá seguindo na direção oeste pela Transamazônica (BR-230), obteve-se o ponto 17 referente a uma vila, com iluminação pública. Nesta vila, as edificações estabeleceram-se ao redor do posto de fiscalização sanitária da Polícia Rodoviária e encontram-se próximas a um entroncamento registrado como ponto 18. A partir deste ponto saímos da rodovia e entramos em uma estrada de terra.

O ponto 19 refere-se à entrada para a sede de uma fazenda avistada a partir da estrada. A ausência de pontos de GPS indica esparsa presença de habitantes, concentrados em pequenos núcleos. O ponto 20 coincide com a sinalização da Reserva Tibiriçá de propriedade do IBAMA. No ponto 21 encontra-se um acampamento de “sem-terras” (aproximadamente 150 famílias) que reivindicam a área da Reserva para assentamento.

A localidade conhecida como Brejo do Meio corresponde ao ponto 23. É um vilarejo com estrutura urbana semi-consolidada incluindo iluminação pública, posto de saúde e escolas que assistem a aproximadamente seis projetos de assentamento (PAs) do INCRA. Segundo informação obtida junto à comunidade local há aproximadamente 2.000 pessoas habitando o vilarejo, sendo que a maioria possui lotes no campo. O censo 2000 contabilizou 900 habitantes para este setor censitário.

O ponto 27 refere-se ao núcleo do PA Alegria com cerca de 5 habitações próximas. Uma área de floresta preservada foi anotada no ponto 29 a caminho da propriedade que foi visitada no ponto 30.

O procedimento para eliminar as células com predominância de corpos d'água e floresta não foi eficiente. Células cuja somatória das classes não atingiu 95%, receberam densidade resultante da aplicação dos operadores. Algumas células tiveram valores de densidade altos, uma vez que a proximidade a rios é alta. Por outro lado, na superfície resultante do *Fuzzy* Máximo, há valores de densidade da menor classe, feição também resultante da escolha do limiar. Este operador selecionou apenas os maiores valores de densidade para a célula. A escolha do limiar para exclusão das células necessita de aperfeiçoamento o que implica em novos testes para que as superfícies aproximem-se da realidade.

As superfícies de Média Simples e Média Ponderada se assemelham muito (Figura 6.9a e 6.9b), sendo que a Média Simples resultou numa graduação maior de valores e a Média Ponderada suavizou mais a superfície. Nenhuma variação de classe foi verificada para o percurso de campo na superfície de Média Ponderada. Apesar de ocorrer variação na percentagem de cobertura florestal, as variáveis distância a vias, rios e centros urbanos de peso superior à floresta para a ponderação não variaram muito neste percurso.

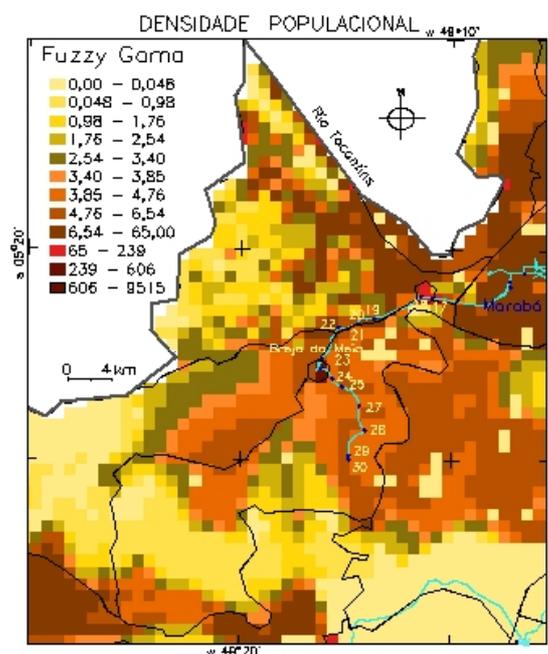


Figura 6.10 – Mapa temático da superfície de densidade de população obtida pelo operador *Fuzzy Gama* para a região a oeste da sede do município de Marabá.

A superfície resultante do operador *Fuzzy Mínimo* (Figura 6.9c) apresentou valores de densidade maiores que o observado para a superfície do operador *Fuzzy Máximo* (Figura 6.9d). Este efeito surge na redistribuição dos valores de população onde o valor *Fuzzy* da célula é ponderado pela soma dos valores do setor censitário. Mantém-se assim o volume, ou seja, o valor de população total do setor censitário. Contudo, a superfície *Fuzzy Mínimo* foi a que melhor representou a heterogeneidade espacial dos setores censitários (Figura 6.9d). Seu aspecto geral é muito semelhante à superfície resultante do operador *Fuzzy Gama* (Figura 6.10). Nesta, os valores intermediários foram substituídos por valores extremos: por exemplo, a mancha da classe 1,75 - 2,54, a oeste do Brejo do Meio na superfície *Fuzzy Mínimo*, foi substituída pelas classes adjacentes na superfície *Fuzzy Gama*.

Estendendo o exercício de redistribuir a população dos setores censitários para o município todo, imagens ETM+/Landsat7 foram utilizadas como suporte para a classificação de áreas de floresta (Figura 6.11). Os setores censitários do município de Marabá têm dimensões variáveis e representam regiões heterogêneas e distintas entre si. Próximos à sede do município os setores são menores e há maior concentração de setores urbanos. Os setores a oeste são os que ainda contém grandes extensões de áreas florestais, o que se atribui à presença de unidades de conservação (Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, Reserva Biológica do Tapirapé, Floresta Nacional do Itacaiúnas) e maior dificuldade de acesso. Apesar da estrada de Marabá para o oeste do município receber pouca manutenção e encontrar-se sem condições de tráfego durante a época das chuvas, é ao longo deste eixo em direção a São Félix do Xingu que o processo de ocupação tem-se intensificado.

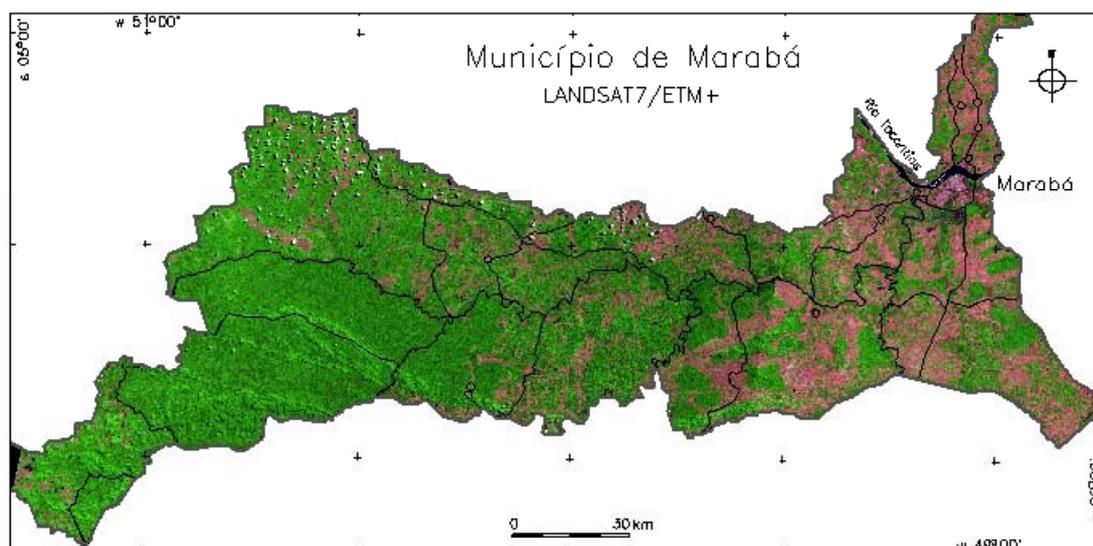


Figura 6.11 – Composição colorida de imagem ETM+/ Landsat7 – R5G4B2 e limites dos setores censitários de Marabá.

As superfícies de densidade resultantes das mesmas variáveis e operadores aplicados para todos os setores do município de Marabá são apresentadas nas Figuras 6.12 a 6.16. Analogamente ao descrito para as superfícies geradas com imagem CCD-CBERS1, às células com mais de 95% de cobertura florestal (somadas com área de corpos d'água e ilhas arenosas) foram atribuídos valores de densidade de população igual a zero. Este critério não foi o suficiente para retirar todas as células do rio Tocantins da superfície de densidade, ao mesmo tempo em que produziu setores sem população. Estes setores do

extremo sudoeste do município correspondem às áreas de unidades de conservação citadas anteriormente, para os quais não foram registradas células com menos de 95% de cobertura florestal. No dado do censo 2000 IBGE não há habitantes registrados para estes setores censitários. Então, apesar de ser uma limitação das considerações iniciais do modelo adotado, para o caso de Marabá, não houve erro nas superfícies proveniente deste procedimento.

A superfície resultante da Média Ponderada (Figura 6.13), quando comparada à superfície de Média Simples (Figura 6.12), apresentou setores com valores de densidade mais homogêneos que os da Média Simples. A atribuição de pesos considerando as distâncias a vias, rios e centros urbanos mais importantes que a percentagem de floresta fez com que a Média Simples tenha desagregado mais os valores de densidade populacional que a Média Ponderada.

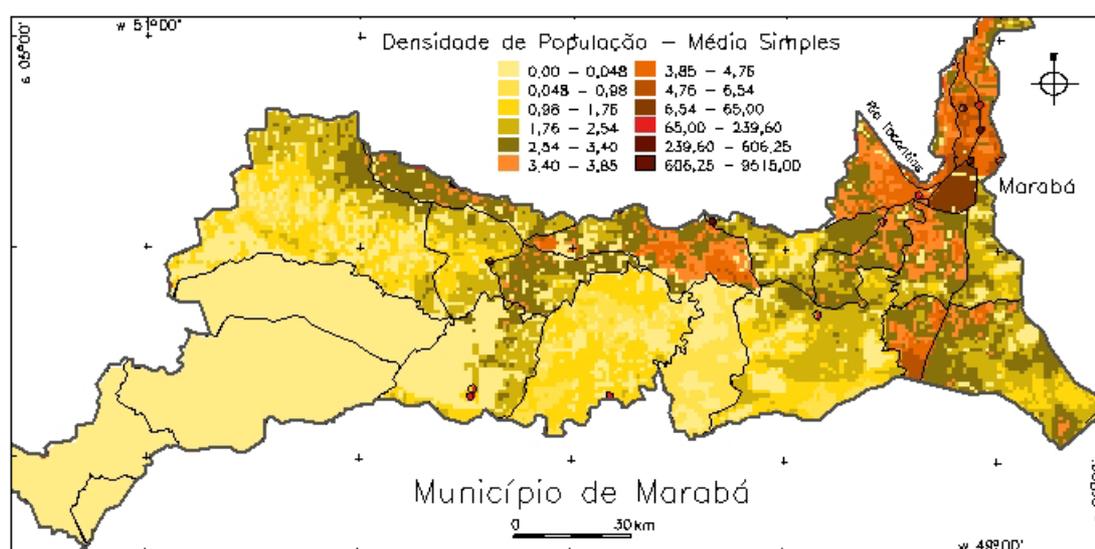


Figura 6.12 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador Média Simples.

A superfície resultante do operador *Fuzzy Mínimo* (Figura 6.14) para todo o município de Marabá superestimou a classe de densidade de 0,00 – 0,048. Este efeito é notado principalmente para setores ao norte e ao sul da sede do município com densidade demográfica maior que 2,5 hab/km<sup>2</sup>. Como este operador seleciona o menor valor de inferência *Fuzzy* para o conjunto de variáveis utilizado, apenas regiões que não tiveram nenhum zero foram computadas para distribuir a população. Apenas as células válidas foram computadas para redistribuir a população superestimando os valores de

densidade. Isto ocorre nos setores com muitas células consideradas inválidas ou que tiveram zero para qualquer uma das variáveis indicadoras. Este efeito se repete para o operador *Fuzzy Gama* (Figura 6.16), uma vez que realiza multiplicação entre os valores e a presença de zeros invalida a célula.

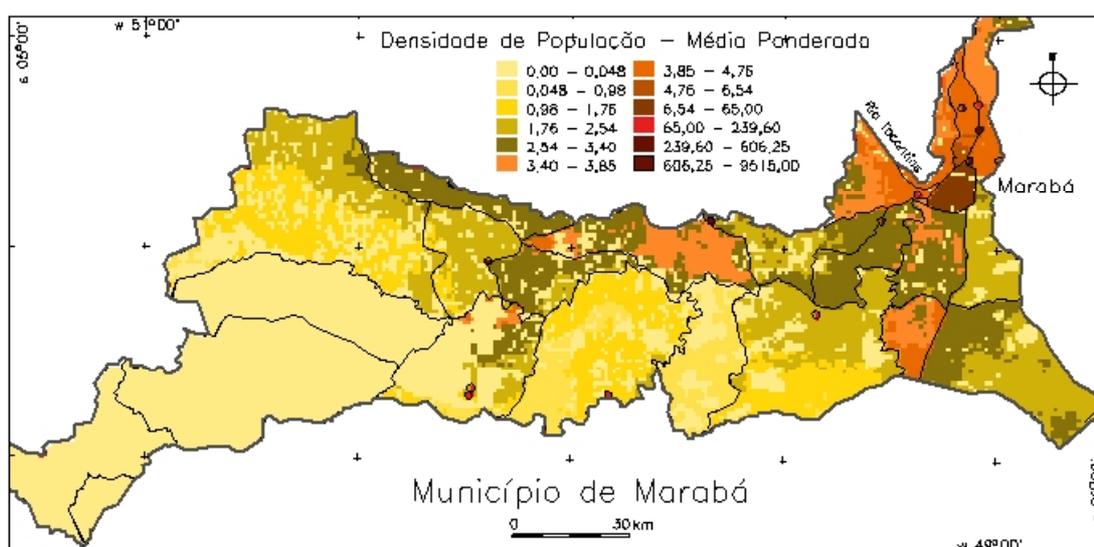


Figura 6.13 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador Média Ponderada.

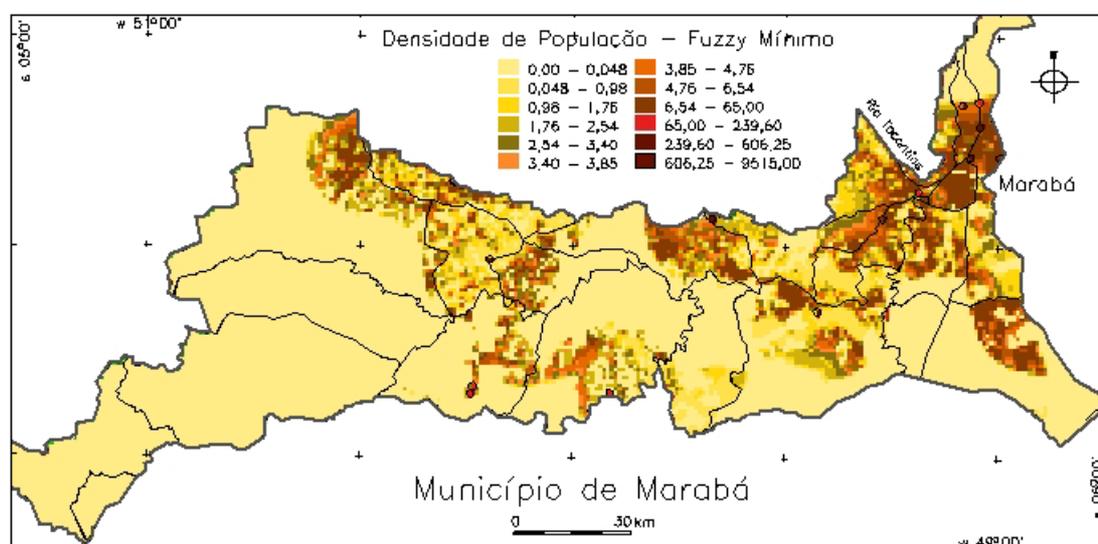


Figura 6.14 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador *Fuzzy* mínimo.

O operador *Fuzzy Máximo* por sua vez, não apresentou as mesmas feições irrealistas descritas para as superfícies resultantes do *Fuzzy Mínimo* e *Fuzzy Gama*. Foram geradas regiões mais homogêneas dentro do setor censitário, com poucas diferenciações. As

áreas de classe de 0,00 – 0,048 foram incluídas pela restrição dos 95% de floresta. A superfície resultante do operador *Fuzzy* Máximo tem um aspecto geral semelhante ao mapa temático da densidade demográfica dos setores censitários (Figura 6.17). A diferença encontra-se na inclusão das áreas que tiveram restrição devido a percentagem de floresta exceder 95% da área da célula. Ou seja, este operador incorporou pouca diversidade espacial a partir das variáveis indicadoras aos valores de densidade demográfica dos setores censitários.

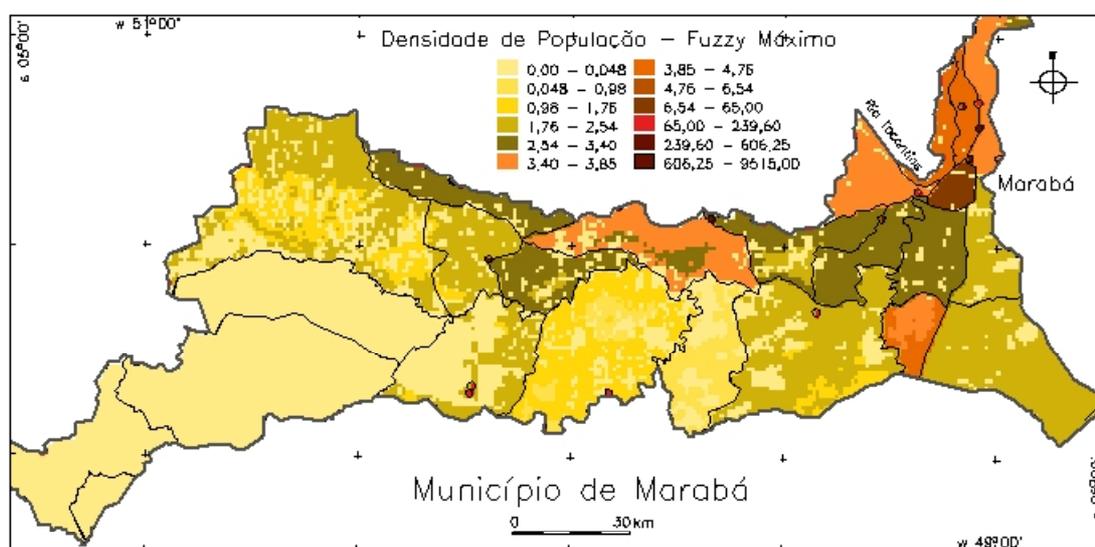


Figura 6.15 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador *Fuzzy* máximo.

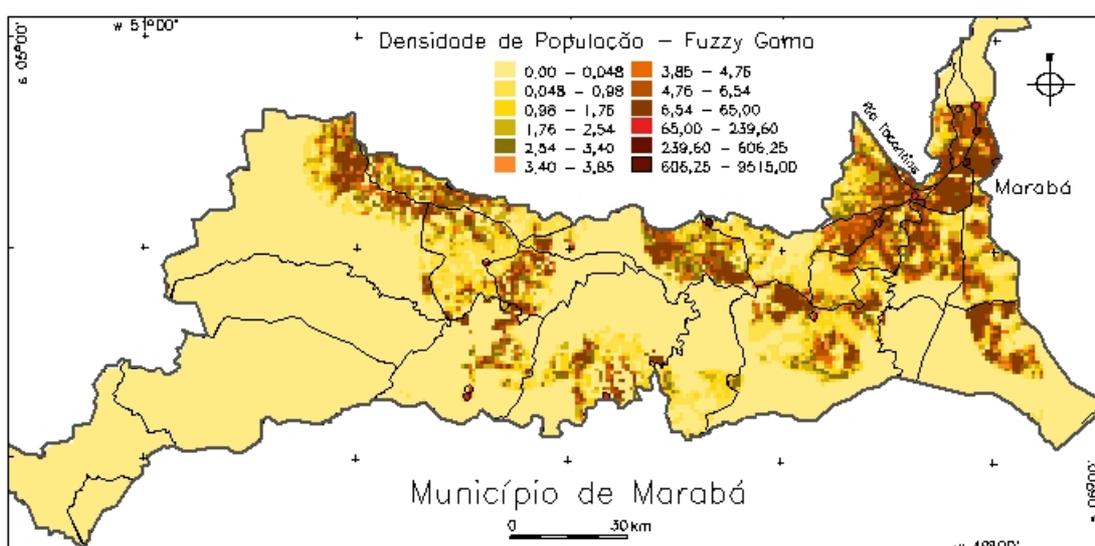


Figura 6.16 – Superfície de densidade de população obtida pelo operador *Fuzzy* Gama.

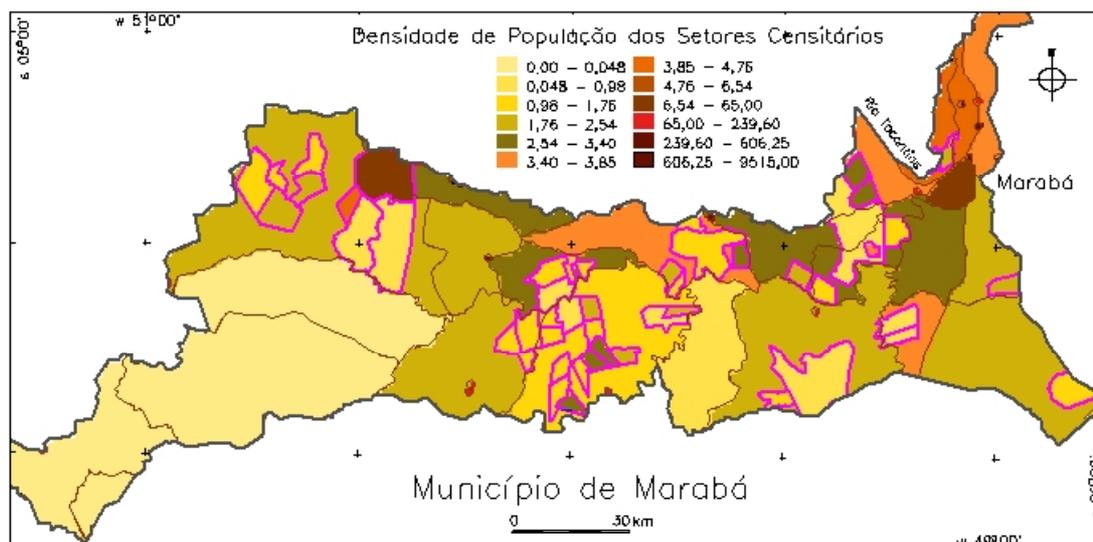


Figura 6.17 – Densidade populacional dos setores censitários 2000 e os limites dos Projetos de Assentamentos de Marabá (limites na cor magenta).

Desta análise ressalta-se que a superfície obtida pela Média Simples das variáveis indicadoras foi a que mais corretamente incorporou variação para distribuir a população nos setores censitários. Os operadores *Fuzzy* Mínimo e Gama foram sensíveis à presença de zeros. A atribuição de pesos para o operador de Média Ponderada não contemplou a importância devida à cobertura florestal. O operador *Fuzzy* Máximo acrescentou pouca variabilidade aos setores para diferenciá-los da distribuição original.

Na inexistência de informações de distribuição populacional mais detalhada que a do setor censitário utilizada para gerar as superfícies de densidade de população, dados de número de pessoas residentes nos Projetos de Assentamento do INCRA (MDA, 2003) foram utilizados para avaliar as superfícies. A localização dos PAs do município de Marabá pode ser observada na Figura 6.17. Considerando a área do Projeto de Assentamento e o número de pessoas, calculou-se um valor de densidade de população média para cada PA. Estes valores foram comparados aos valores dos intervalos de densidade populacional usados para a apresentação dos mapas temáticos de onde se obteve os valores de exatidão global (percentagem de área classificada corretamente) apresentados na Tabela 6.4.

A superfície resultante do operador *Fuzzy* Gama foi a que mais se aproximou dos valores de densidade atribuídos aos Projetos de Assentamentos (18,8%). Este maior

número de acertos ocorreu para a classe de menor densidade de população (0,00 - 0,048 hab/km<sup>2</sup>) e de maior densidade registrada para os PAs (6,54 - 65,00 hab/km<sup>2</sup>) . Apesar do operador *Fuzzy* Mínimo ter gerado uma superfície muito semelhante, a densidade dos PAs foi melhor representada pela superfície *Fuzzy* Gama. Destaca-se a Média Simples com resultado intermediário entre o *Fuzzy* Gama e os demais operadores. Enquanto o valor de exatidão global obtido para o operador *Fuzzy* Gama (18,8%) reflete a percentagem de acerto para as classes de densidade populacional extremas, o valor de Exatidão Global obtida pelo operador Média Simples (14,3%) reflete acertos para as classes intermediárias de densidade de população. As outras superfícies tiveram um desempenho semelhante ao obtido na comparação entre as densidades populacionais dos Projetos de Assentamentos e dos setores censitários.

TABELA 6.4 – Exatidão Global (%) da densidade de população obtida pelos operadores em relação aos Projetos de Assentamento do INCRA .

| <b>Superfície de Densidade</b> | <b>Exatidão Global (%)</b> |
|--------------------------------|----------------------------|
| Média Simples                  | 14,3                       |
| Média Ponderada                | 10,4                       |
| <i>Fuzzy</i> Mínimo            | 10,4                       |
| <i>Fuzzy</i> Máximo            | 9,5                        |
| <i>Fuzzy</i> Gama              | 18,8                       |
| Setores Censitários            | 11,8                       |

#### 6.4 Considerações do capítulo

Este capítulo apresentou uma proposta metodológica para construir superfícies de densidade populacional desagregando a população dentro dos setores censitários, no município de Marabá. Apesar dos dados terem sido apresentados e discutidos a partir de intervalos de classes de densidade visualizados nos mapas temáticos, no banco de dados, as superfícies de densidade correspondem a grades com valores contínuos de densidade. Os mapas temáticos foram o recurso utilizado para facilitar a análise e comparação dos resultados.

A primeira consideração colocada para a construção da metodologia restringia a ocorrência de população em locais ocupados preferencialmente por corpos d'água e

floresta. Células onde as classes floresta, água e ilhas arenosas somaram mais que 95% da área receberam valores nulos de densidade demográfica e foram removidas do conjunto de células para o cálculo de área. Apesar deste procedimento ter reduzido 43% do total de células ainda não foi o suficiente para representar regiões como as margens do Tocantins. Isto foi demonstrado pelos resultados das superfícies desenvolvidas para uma região do município. A escolha de novos limiares poderia minimizar este efeito.

As variáveis distância a vias, distância a rios, distância a centros urbanos, percentagem de floresta e declividade foram selecionadas como indicadoras da presença de população. Esta escolha foi baseada em exemplos encontrados na literatura e em informações históricas sobre a região. Uma ponderação incluindo novas variáveis poderia gerar uma superfície adjacente mais relacionada à distribuição da população. A partir do observado no campo pode-se sugerir como exemplo, algumas variáveis indicadoras adicionais:

- percentagem das diferentes cobertura ou uso do solo;
- distância a vias de acordo com a importância na circulação de mercadorias - rodovias federais, estaduais, estradas vicinais e de acordo com as condições de tráfego;
- distância de infra-estrutura básica como escolas e posto de saúde;
- distância a laticínios. A venda diária do leite depende do percurso do caminhão privilegiar ou não a propriedade do produtor;

A relação entre as variáveis e a presença de população foi obtida considerando-se a localização dos distritos no estado do Pará como referência para a presença de população. Os distritos são resultantes do reconhecimento de núcleos urbanos que se consolidam pela importância local. Desta forma, as relações definidas a partir dos distritos foram generalizadas para supor a distribuição da população para todo o município, incluindo a zona rural. A constatação em campo de que mesmo na zona rural as edificações tendem a um padrão agrupado sustenta esta generalização.

Para o relacionamento entre as variáveis, optou-se por avaliar relações empíricas definidas por operadores de média e de inferência *Fuzzy*. Estas relações poderiam ser

definidas a partir de modelos teóricos mais robustos que descrevessem os processos de ocupação e mobilidade da população. Isto facilitaria a discussão dos resultados e permitiria a distribuição mais precisa da densidade demográfica. A metodologia desenvolvida facilita a acomodação de novos modelos, se eles existirem.

Os resultados obtidos indicaram a Média Simples das variáveis como o operador que melhor desagregou a população para todo o município. Apresentou ainda uma relação com os dados de Projetos de Assentamentos do INCRA superior ao que se obteria com a simples densidade demográfica do setor censitário.

Outra contribuição deste capítulo refere-se ao uso de dados de sensoriamento remoto para auxiliar a distribuição da população, principalmente quanto ao potencial do uso de imagens CBERS1 na classificação de cobertura do solo. As classes floresta, corpos d'água e ilhas arenosas foram identificadas através de técnicas simples de aplicação de limiares. Imagens do CBERS2 poderão dar continuidade a estes estudos, incluindo dados de outros sensores.

Da análise das superfícies de densidade de população, conclui-se também que o peso para a percentagem de floresta poderia ser reformulado. A importância desta variável foi realçada no campo, ao se constatar que os lotes que contém floresta remanescente têm um valor agregado uma vez que significam reserva de propriedade. Outra variável indicadora pode ser proposta, a que considera a distância às áreas de remanescentes florestais.

As informações de campo deveriam anteceder a elaboração das superfícies. Isto não implicaria em "surveys" mas em uma visita rápida em áreas características, previamente elegidas. Desta forma, as relações entre as variáveis retratariam com maior fidelidade os processos atuais de distribuição da população no local. Adicionalmente, um conjunto de dados de campo para análise e validação das superfícies permitiria atribuir valores de precisão de mapeamento às superfícies de densidade obtidas.

Apresentou-se uma proposta metodológica e uma primeira aproximação de como criar superfícies adjacentes para representar a distribuição espacial da população e as superfícies de densidade resultantes. A distribuição da densidade de população em

células será mais próxima da realidade quanto melhor forem definidas as variáveis indicadoras e as relações entre elas. Melhorando-se as premissas associadas à presença da população, novas regras podem ser estabelecidas. Isto aproximaria as superfícies de população à realidade da distribuição da densidade populacional em territórios Amazônicos.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou dados de sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial para propor representações alternativas da distribuição da densidade populacional na Amazônia Brasileira. Diferentes superfícies de densidade de foram apresentadas, e dois novos métodos foram propostos. O primeiro foi desenvolvido para a Amazônia Legal e utilizou informações oriundas do mosaico de luzes noturnas do DMSP/OLS. O segundo foi desenvolvido para os setores censitários do município de Marabá e contou com informações das imagens dos sistemas CCD-CBERS1 e TM-Landsat. A utilização de dados de sensoriamento remoto nas duas escalas consideradas foi essencial para redistribuir a densidade de população nas células das superfícies de densidade.

Foi demonstrado que mosaico de imagens de luzes noturnas DMSP/OLS detectam a presença de diferentes atividades humanas, além de indicarem níveis de consumo de energia elétrica e da extensão da área urbanizada. Estimativas de densidade de população urbana também podem ser obtidas a partir de relações lineares entre as áreas de luzes e de população urbana. Contudo, a elaboração do mosaico de imagens de luzes noturnas e a definição dos limiares para identificação dos focos de luzes devem ser criteriosos para que interpretações errôneas dos dados não sejam obtidas. No produto de luzes estáveis gerado neste trabalho, não há focos referentes a luzes efêmeras (incêndios florestais). Todo foco identificado corresponde a alguma atividade que demandasse iluminação. Entretanto, nem todo foco de luz corresponde à presença de população. Estas observações devem ser consideradas ao se estabelecer relações entre variáveis de luzes noturnas e outras variáveis geográficas ou socioeconômicas.

O mosaico de luzes noturnas DMSP-2002 gerado neste trabalho possibilitou estimar população urbana e serviu de referência para o cálculo e alocação da densidade de população urbana em uma superfície de densidade. A superfície criada através de um procedimento multivariado (*DMSPop\_M*) alocou a densidade populacional urbana com base nos focos de luzes noturnas.

A imagem CCD-CBERS1 utilizada neste trabalho possibilitou a elaboração de uma metodologia baseada na heterogeneidade espacial da cobertura do solo e outras variáveis para distribuir a população nos setores censitários do município de Marabá. Esta heterogeneidade espacial não foi considerada na geração da superfície criada pelo método *DMSPop\_M*. A escala de trabalho condicionada pela resolução de 1 km do DMSP/OLS e pelos limites municipais da Amazônia Legal, e a própria natureza dos dados DMSP de origem não permitiam tal distinção. Porém, para alguns setores censitários do município de Marabá, técnicas simples de classificação digital extraíram da imagem CCD\_CBERS1 a ocorrência de cobertura florestal densa e de corpos d'água. Estas classes permitiram restringir a área para qual a população seria realocada dentro dos setores censitários. A partir da metodologia desenvolvida, foi possível generalizar o procedimento para todo o município com o uso de imagens TM-Landsat.

Métodos dasimétricos, como o implementado com as imagens CCD-CBERS1 e TM-Landsat, facilitam o uso de dados de sensoriamento remoto para reestruturar dados censitários (Langford *et al.*, 1991). Isto se justifica pelo fato das propriedades de uso e cobertura do solo serem fatores intrínsecos ao processo de distribuição da população (Flowerdew e Green, 1989). O método de ponderação adotado para este trabalho baseou-se em conhecimentos empíricos para atribuir valores à classe de cobertura do solo, isto é, percentagem de floresta. É conhecido que existem métodos mais sofisticados baseados em regressão linear (Yuan *et al.*, 1997; Martin *et al.*, 2000), por exemplo, para definição das diferentes proporções de classes de uso e cobertura, que poderiam ser utilizados para atribuir os pesos e redistribuir a população.

Quanto à representação da densidade populacional foram apresentadas superfícies regulares como alternativas à estrutura de limites poligonais, sejam dos municípios ou dos setores censitários.

Os métodos de interpolação univariados comumente usados para criar superfícies de densidade a partir de pontos ou polígonos de contagem de população, têm como superfície adjacente o próprio conceito do método de interpolação. Desta forma, os métodos Picnofilático de Tobler e dos centróides populacionais de Martin não resultaram em superfícies ideais para utilização em modelagem, por exemplo. Mesmo quando aplicados sobre os setores censitários da Amazônia Legal, a grande

heterogeneidade da região implicou em feições de agregação indesejadas. Apesar da técnica de krigeagem resultar em superfícies imprecisas, sobre as quais não se pode obter o valor real de densidade, esta técnica mostrou-se útil para análise de padrões gerais permitindo caracterizar as grandes tendências de concentração da população para o período de 1991-1996-2000 na Amazônia Brasileira.

A superfície de densidade gerada a partir do método multivariado proposto *DMSPop\_M* incorpora as informações de luzes noturnas da imagem DMSP/OLS para representar a densidade populacional da região Amazônica. Quando comparado à superfície de densidade resultante da ponderação pela área dos setores censitários observou-se um aspecto geral muito semelhante. Contudo, também foram notadas muitas diferenças de omissão e inclusão para as classes de densidade analisadas. A heterogeneidade espacial presente nos dados de população dos setores censitários não foi introduzida na superfície adjacente deste método. Desta forma não seria possível que a superfície resultante expressasse esta variação. Mesmo com as limitações apresentadas, esta superfície mostrou-se como uma opção intermediária entre a representação por limites municipais e a representação através dos setores censitários para a Amazônia Legal com a vantagem de ter em uma mesma superfície a distribuição da população urbana e rural.

Para a escala municipal, a principal contribuição das superfícies de densidade de população criadas para Marabá residiu na proposta metodológica de outro método multivariado. Um modelo conceitual que selecionasse outras variáveis e/ou definisse outras relações entre as variáveis indicadoras poderia ser facilmente implementado através dos procedimentos propostos. Resultados e superfícies mais precisas seriam obtidos para quanto mais calibradas e adaptadas localmente fossem as variáveis selecionadas e as relações entre elas para indicar a presença de população. Informações de campo e conhecimento dos processos locais são fundamentais para que um bom modelo de superfície adjacente possa ser construído.

Quanto à análise demográfica, a contribuição deste trabalho limitou-se à descrição das superfícies e caracterizações de tendência global. Porém, a estruturação dos dados originais e resultantes das análises em um sistema de banco de dados geográfico possibilita a realização de estudos demográficos sobre a redistribuição da população tais como o realizado para o estado de São Paulo (Cunha e Baeninger, 1994). A análise da

participação relativa da população por regiões, da taxa de crescimento da população urbana, rural e total e das categorias dos tamanhos dos municípios pode ser realizada com auxílio das informações presentes nas superfícies. Da mesma forma como o realizado para São Paulo, as superfícies de densidade geradas e as informações estruturadas no banco de dados viabilizariam a síntese espaço/tempo do fenômeno demográfico da redistribuição populacional. Supõe-se que a representação através de superfícies facilite a análise temporal, uma vez que não haveriam problemas relacionados à evolução do recorte das malhas municipais.

Quanto aos dados e as informações produzidas neste trabalho, foi possível estruturar um banco de dados para estudos de processos demográficos na Amazônia Legal e Marabá. Este trabalho também possibilita a geração de novos mosaicos de luzes noturnas DMSP/OLS. As rotinas desenvolvidas e implementadas estão disponíveis à comunidade em geral bem como, as imagens mosaico de luzes noturnas DMSP/OLS para 2002 e 2003.

Adicionalmente, atividades de modelagem que pretendam incorporar a dimensão humana, traduzida na distribuição espacial da população, podem usar diretamente as superfícies criadas para a Amazônia Legal ou para Marabá, de acordo com a escala de interesse. Este trabalho facilita a inclusão da densidade de população na modelagem espacial de processos ambientais e socioeconômicos na região Amazônica.

Uma proposta para continuidade deste trabalho reside no estudo de superfícies de densidade de população para representar e simular os processos de migração interna na região Amazônica. Apesar do atual arrefecimento dos fluxos migratórios para a região ainda há uma intensa mobilidade interna. Este movimento tem sido responsável pela evolução das áreas de fronteira, pelo surgimento de novos núcleos de assentamentos humanos e por processos de concentração em cidades de médio porte. Para viabilizar este tipo de abordagem, faz-se necessário acoplar o sistema das redes urbanas às superfícies de densidade de população. Desta forma seria possível identificar as regiões de atração e de repulsa bem como, os fluxos não só de pessoas, mas de bens, serviços e informações entre localidades. As inter-relações entre estes fluxos e a heterogeneidade geográfica, presente nas informações de sensoriamento remoto, podem implicar em diferentes superfícies e padrões de distribuição da densidade populacional.

Um primeiro passo foi dado para aplicar geoinformação em estudos demográficos. Apesar das limitações deste trabalho, espera-se ter criado uma interface para que técnicas de análise espacial e dados de sensoriamento remoto possam ser mais amplamente utilizados pela demografia. E por outro lado, espera-se que o conhecimento demográfico possa aprimorar a aplicação das técnicas da geoinformação. Assim, como meta final, talvez seja possível em longo prazo aumentar a compreensão sobre a dinâmica populacional na Amazônia não apenas como determinante, mas também como consequência de fatores ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADINIYI, P.O. Using Remotely Sensed Data for Census Surveys and Population Estimation in Developing Countries: Examples from Nigeria. **Geocarto International**, v.2, n.4, p. 11-31, 1987.
- AKAIKE, H. A New Look at Statistical Model Identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v.19, n.6, p. 716-723, 1974.
- ALCAMO, J.; ENDEJAN, M.; KASPAR, F. The GLASS1 model: A concept for global modeling of environmental security. In: Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community (IHDP), **Proceedings**. Kanagawa, Japan, 1999.
- ALVES, D. An analysis of the geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazônia in the 1991-1996 period. In: 48th Annual Conference of the Center for Latin American Studies - Patterns and Processes of Land Use and Forest Change in the Amazon, **Proceedings**. University of Florida, Gainesville, 1999.
- AMARAL, S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V.; QUINTANILHA, J.A.; ELVIDGE, C.D. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazônia using DMSP night-time satellite data. **Computer Environment and Urban Systems**, Disponível online: 21 November 2003.
- AN, P.; MOON, W.M.; RENCZ, A. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. **Canadian Journal of Exploration Geophysics**, v.27, p. 1-11, 1991.
- BALLESTER, M. V. R.; VICTORIA, D. DE C.; KRUSCHE, A. V.; COBURN, R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E.; LOGSDON, M.G.; MAYORGA, E.; MATRICARDI, E. A remote sensing/GIS-based physical template to understand the biogeochemistry of the Ji-Paraná river basin (Western Amazônia). **Remote Sensing of Environment**, In Press. Available online 14 October 2003.
- BECKER, B. K. Undoing Myths: The Amazon - An Urbanized forest. In: G. M. Clüsener, Sachs, I. **Brazilian Perspectives on sustainable development of the Amazon region - Man and Biosphere Series**. Paris, UNESCO e Parthenon Publish Group Limited, 1995, p. 53-89.
- BECKER, B. K. **A Especificidade do Urbano na Amazônia: Desafios para políticas Públicas Consequentes. Estudo elaborado para a Secretaria de Coordenação dos Assuntos da Amazônia Legal - Ministério do Meio Ambiente**. Rio de Janeiro, Ministério do Meio Ambiente, 1998. 60 p.
- BECKER, B. K. Mesa Redonda: Sensoriamento Remoto e a questão urbana na Amazônia. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Proceedings**. Foz do Iguaçu - PR, 2001.
- BHADURI, B.; BRIGHT, E.; COLEMAN, P.; DOBSON, J. E. LandScan Locating people is what matters. **GeoInformatics**, p. 34-37, 2002.

- BRACKEN, I. A surface model approach to the representation of population-related social indicators. In: A. S. Fortheringham e P. Rogerson. **Spatial Analysis and GIS**, Taylor & Francis, 1994, p. 245-259.
- BRACKEN, I.; MARTIN, D. Linkage of the 1981 and 1991 Censuses using surface modelling concepts. **Environment and Planning A**, v.26, p. 379-390, 1995.
- BROWDER, J.O.; GODFREY, B.J. **Rainforest Cities: Urbanization, development, and globalization of the Brazilian Amazon**. New York: Columbia University Press, 1997. 429 p.
- BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographic information systems**. Oxford: University Press, 1998.
- CARVALHO, M.C. Satélite revela avanço da escuridão em SP. **Folha de São Paulo**, 5 de agosto de 2001, Vale, p.Capa e C5.
- CASTRO, E.R.; MONTEIRO, R.; CASTRO, C. P. **Atores e relações sociais em novas fronteiras na Amazônia - Novo Progresso, Castelo de Sonhos e São Félix do Xingu. Estudo sobre dinâmicas sociais na fronteira, desmatamento e expansão da pecuária na Amazônia**. Belém, Ministério do Meio Ambiente, 2002. 141 p.
- CHEN, S.; ZENG, S.; XIE, C. Remote sensing and GIS for urban growth analysis in China. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.5, p. 593-598, 2000.
- CONGALTON, R.G.; ODERWALD, R.G.; MEAD, R.A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, p. 1671-1678, 1983.
- CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data**. Chichester: John Wiley, 1993.
- CROFT, T.A. Nighttime images of the earth from space. **Scientific America**, v.239, p. 86-98, 1978.
- CUNHA, J.M.P. Migração do Centro-Oeste Brasileiro: as tendências e características do período 1986/96. In: D. J. Hogan, R. L. Carmo, J. M. P. Cunha e R. Baeninger. **Migração e Ambiente no Centro-Oeste**. Campinas - SP, Núcleo de Estudos de População/UNICAMP: PRONEX, 2002, p. 89-134.
- CUNHA, J.M.P.; BAENINGER, R. **Sistemas de Informações geográficas (GIS): um novo instrumento para estudos demográficos. Aplicação dos GIS ao caso da redistribuição espacial da população**. Textos NEPO 29. Campinas, Núcleo de Estudos Populacionais - Nepo/ UNICAMP, 1994. 53 p.
- DE REYNAL, V.; HEBETTE, J.; MUCHAGATA, M.G.; TOPALL, O. **Agriculturas familiares e desenvolvimento em frente pioneira amazônica**, LASAT-CAT/GRET/UAG, 1995. 70 p.
- DEICHMANN, U.; BALK, D.; YETMAN, G. **Transforming Population Data for Interdisciplinary Usages: From census do grid**. Palisades, N.Y., Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) - Columbia University, 2001. Disponível em: <<http://sedac.ciesin.org/plue/gpw/index.html?main.html&2>>.

- DEICHMANN, U.; EKLUNDH, L. **Global digital datasets for land degradation studies: A GIS approach, Global Resource Information Database, Case Study No.4.** Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme, 1991.
- DOBSON, J.E.; BRIGHT, E.A.; COLEMAN, P.R.; DUREE, R.C.; WORLEY, B.A. LandScan: A Global Population Database for Estimating Populations at Risk. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.7, p. 849-857, 2000.
- DOLL, C.N.H.; MULLER, J.P.; ELVIDGE, C.D. Night-time Imagery as a Tool for Global Mapping of Socioeconomic Parameters and Greenhouse Gas Emissions. **AMBIO**, v.29, n.3, p. 157-162, 2000.
- DURIEUX, L.; MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n.1, p. 132-140, 2003.
- ELVIDGE, C.D.; BAUGH, K.E.; DIETZ, J.B.; BLAND, T.; SUTTON, P.; KROEHL, W. Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlements. **Remote Sensing of Environment**, v.68, p. 77-88, 1999.
- ELVIDGE, C.D.; BAUGH, K.E.; HOBSON, V.H.; KIHN, E.A.; KROEHL, H.W.; DAVIS, E.R.; COCERO, D. Satellite inventory of human settlements using nocturnal radiation emissions: A contribution for the global toolchest. **Global Change Biology**, v.3, p. 387-395, 1997b.
- ELVIDGE, C.D.; BAUGH, K.E.; KIHN, E.A.; KROEHL, H.W.; DAVIS, E.R. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.63, n.6, p. 727-734, 1997a.
- ELVIDGE, C.D.; BAUGH, K.E.; KIHN, E.A.; KROEHL, H.W.; DAVIS, E.R.; DAVIS, C.W. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.6, p. 1373-1379, 1997c.
- ELVIDGE, C.D.; HOBSON, V.H.; NELSON, I.L.; SAFRAN, J.M.; TUTTLE, B.T.; DIETZ, J.B.; BAUGH, K.E. **Global Observation of Urban areas based on nocturnal lighting.** Boulder, Colorado, NOAA, 2001a. 71-76 p.
- ELVIDGE, C.D.; IMHOFF, M.L.; BAUGH, K.E.; HOBSON, V.R.; NELSON, I.; DIETZ, J.B. **Nighttime Lights of the World: 1994-95.** Global and Planetary Change, 2000.
- ELVIDGE, C.D.; IMHOFF, M.L.; BAUGH, K.E.; HOBSON, V.R.; NELSON, I.; SAFRAN, J.; DIETZ, J.B.; TUTTLE, B.T. Night-time Lights of the World: 1994-95. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.56, p. 81-99, 2001b.
- EMMANUEL, R. Urban Vegetational Change as an Indicator of Demographic Trends in Cities: the Case of Detroit. **Environment and Planning A**, v.24, p. 415-426, 1997.
- EMMI, M.F. **A oligarquia da castanha: crise e rearticulação.** Belém, Cadernos do NAEA/UFPA, 1989. 127-161 p.
- ENTWISTLE, B. ; WALSH, S. ; RINDFUSS, R; CHAMRATRITHIRONG, A. Land-Use/Land-Cover and Population Dynamics, Nang Rong, Thailand. In: D. Liverman, E. Moran, R. Rindfuss e P. Stern. **People and Pixels.** Washington, DC, National Academy Press, 1998.

FAURE, J.F.; TRAN, A.; GARDEL, A.; POLIDORI, L. Sensoriamento remoto das formas de urbanização em aglomerações do litoral Amazônico: elaboração de um índice de densidade populacional. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Proceedings**. Belo Horizonte, 2003. p.1771-1779.

FEARNSIDE, P.M. Saving tropical forests as a global warming countermeasure: an issue that divides the environmental movement. **Ecological Economics**, v.39, n.2, p. 167-184, 2001.

FISHER, P.F.; LANGFORD, M. Modelling the errors in areal interpolation between zonal systems by Monte Carlo simulation. **Environment and Planning A**, v.27, p. 211-224, 1995.

FLOWERDEW, R.; GREEN, M. Statistical methods for inference between incomparable zonal systems. In: M. F. Goodchild e S. Gopal. **Accuracy of spatial databases**. New York, Taylor & Francis, 1989, p. 239-248.

FROHN, R.C.; MCGWIRE, K.C. ; DALES, V.H.; ESTES, J.E. Using satellite remote sensing to evaluate a socio-economic and ecological model of deforestation in Rondonia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p. 3233-3255, 1996.

GEIST, H.J.; LAMBIN, E.F. **What Drives Tropical Deforestation?** Louvin, Belgium: LUCC International Project Office, 2001. 116 p.

GEOMA, REDE TEMÁTICA DE PESQUISA EM MODELAGEM AMBIENTAL NA AMAZÔNIA -. Dinâmica Populacional e Assentamentos Humanos na Amazônia. In: Workshop on Geoprocessing and Environmental Modeling, **Proceedings**. LNCC, Petrópolis - RJ, MCT - Rede Temática Geoma, 2002. p.4.

GEOMA, REDE TEMÁTICA DE PESQUISA EM MODELAGEM AMBIENTAL NA AMAZÔNIA -. **Dinâmica Territorial e Sócio-ambiental das Frentes de Ocupação e Áreas Consolidadas : os casos de São Félix do Xingu-Iriri e da região de Marabá**. Marabá, MCT - Rede Temática Geoma, 2003. 6 p.

GOODCHILD, M.F.; ANSELIN, L.; DEICHMANN, U. A framework for the areal interpolation of socioeconomic data. **Environment and Planning A**, v.25, p. 383-397, 1993.

GREEN, N.E. Aerial photographic interpretation and the social structure of the city. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.23, n.1, p. 89-96, 1957.

HARVEY, J.F. Population estimation models based on individual TM pixels. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.68, n.11, p. 1181-1192, 2002.

HEBETTE, J. A ocupação camponesa de uma área de fronteira e sua dinâmica social: o caso do Pau Seco/Cametau. **Atlas do Seminário Agricultura familiar e Desenvolvimento Rural na Amazônia Oriental**. Université Antilles - Guyane, SACAD, 1992, p. 65-85.

HOGAN, D. J. **População e Meio Ambiente**. Textos NEPO 16. Campinas, Núcleo de Estudos Populacionais - NEPO / UNICAMP, 1989. 86 p.

HOGAN, D. J. A relação entre população e ambiente: desafios para a demografia. In: H. Torres e H. Costa. **População e Meio Ambiente. Debates e Desafios**. São Paulo, Editora SENAC, 2000, p. 21-52.

HOGAN, D. J. Demographic Aspects of Global Environmental Change: What is Brazil Contribution? In: D. J. Hogan e M. T. Tolmasquim. **Human Dimension of Global Environmental Change**. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, 2001, p. 17-41.

IBAMA. **Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal**. 2002, <<http://www2.ibama.gov.br/proarco/home.htm>>. Acesso em: 2003.

IBGE (ed.). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD de 1995**. Rio de Janeiro, Ministério do Planejamento e Orçamento, 1995. 106p.

IBGE. **Pesquisa Nacional Por Amostra de Domicílios - PNAD 1999, Notas Metodológicas**. 1999, <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad99/metodologia99.shtm>>. Acesso em: 2002.

IBGE. **Censo Demográfico 2000**, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2001.

IBGE. **Estimativas Populacionais do Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Municípios. Metodologia**. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002. 22 p.

IBGE. **Malha Municipal 1997**. 2003a, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, <[http://www2.ibge.gov.br/pub/Organizacao\\_do\\_Territorio/Malha\\_Municipal\\_1997/](http://www2.ibge.gov.br/pub/Organizacao_do_Territorio/Malha_Municipal_1997/)>. Acesso em: 2000.

IBGE. **Estimativas das populações residentes, 2001 e 2002**. 2003b, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, <[http://www2.ibge.gov.br/pub/Estimativas\\_Projecoes\\_Mortalidade\\_Populacao/](http://www2.ibge.gov.br/pub/Estimativas_Projecoes_Mortalidade_Populacao/)>. Acesso em: 2003.

IISAKA, J.; HEGEDUS, E. Population estimation from Landsat Imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.12, p. 259-272, 1982.

IMHOFF, M.L.; LAWRENCE, W.T.; ELVIDGE, C.D.; PAUL, T.; LEVINE, E.; PRIVALSKY, M.V.; BROWN, V. Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v.59, p. 105-117, 1997b.

IMHOFF, M.L.; LAWRENCE, W.T.; STUTZER, D.C.; ELVIDGE, C.D. A Technique for Using Composite DMSP/OLS "City Lights" Satellite Data to Map Urban Areas. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p. 361-370, 1997a.

INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite Projeto PRODES**. 2003, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em: 2003.

JAKOB, A.A.E. Krigagem como método de Análise de Dados Demográficos. In: XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais, **Proceedings**. Ouro-Preto-MG, 2002.

JENSEN, J.R.; COWEN, D.C. Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.5, p. 611-622, 1999.

- KRAMER, H. J. A.19 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) and A.19.1 DMSP data availability: visible and infrared imagery. **Observation of the Earth and its environment: Survey of Missions and Sensors**. Berlin, Springer-Verlag, 1994, p. 61-67.
- KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. Johannesburg. **Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, v.52, n.6, p. 119-139, 1951.
- LANGFORD, M.; MAGUIRE, D.J.; UNWIN, D.J. The areal interpolation problem: estimating population using using remote sensing in a GIS framework. In: I. Masser e M. Blakemore. **Handling geographical information**. London, Longman, 1991, p. 55-77.
- LANGFORD, M.; UNWIN, D.J. Generating and mapping population density surfaces within a geographical information system. **The Cartographic Journal**, v.31, p. 21-26, 1994.
- LAURANCE, W.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. The future of the Brazilian Amazon. **Science**, v.291, n.5503, p. 438-443, 2001.
- LAURANCE, W.; FEARNSIDE, P.M. Letters - Issues in Amazonian Development. **Science**, v.295, p. 1643, 2002.
- LAURANCE, W.; ALBERNAZ, A.K.M.; SCHROTH, G.; FEARNSIDE, P.M.; BERGEN, S.; VENTICINQUE, E.M.; DA COSTA, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. **Journal of Biogeography**, v.29, p. 737-748, 2002.
- LBA. **The Large Scale Biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA)**. 2003, CPTEC - INPE, <<http://lba.cptec.inpe.br/lba/index.html>>. Acesso em: 2003.
- LEDDY, R.; MARTHUR, P. Estimating Local Populations in West Africa with Lights, Infrastructure, Other. In: ESRI International User's Conference, **Proceedings**. San Diego, California, ESRI International, 2002.
- LO, C.P. Automated population and dwelling unit estimation from high-resolution satellite images: a GIS approach. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, n.1, p. 17-35, 1995.
- LO, C.P.; FABER, B.J. Integration of Landsat Thematic Mapper and Census Data for Quality of Life Assessment. **Remote Sensing of the Environment**, v.62, p. 143-157, 1997.
- LU, A.; LI, C.; LIN, Z. Modeling middle urban population density with remote sensing imagery. In: Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, **Proceedings**. Ottawa, 2002.
- MACHADO, L.O. **Urbanização e Mercado de trabalho na Amazônia Brasileira**. Cadernos IPPUR. Rio de Janeiro, 1999. 109-138 p.
- MADEIRA, J. L.; SIMÕES, C.C.S. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. **Revista Brasileira de Estatística**, v.33, n.129, p. 3-11, 1972.

- MARQUES, M.L.; FORESTI, C. Análise espacial da estrutura urbana da cidade litorânea de Itanhaém (SP). **Geografia**, v.26, n.1, p. 7-35, 2001.
- MARTIN, D. Mapping population data from zone centroid locations. **Transactions of the Institute of British Geographers NS**, v.14, p. 90-97, 1989.
- MARTIN, D. **Geographic Information Systems and their Socioeconomic Applications**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Routledge, 1996. 210 p.
- MARTIN, D. Census Population Surfaces. In: P. Rees, Martin, D., Williamson, P. **The Census Data System**. Chichester - England, John Wiley & Sons, 2002, p. 139-148.
- MARTIN, D.; HARRIS, J.; SADLER, J.; TATE, N. Putting the census on the web: lessons from two case studies. **Area**, v.30, n.3, p. 311-320, 1998.
- MARTIN, D.; LANGFORD, M.; TATE, N.J. Refining Population Surface Models: Experiments with Northern Ireland Census Data. **Transactions in GIS**, v.4, n.4, p. 343-360, 2000.
- MARTIN, D.; BRACKEN, I. Techniques for modelling population-related raster databases. **Environment and Planning A**, v.23, p. 1069-1075, 1991.
- MARTIN, D.; GASCOIGNE, R. Change and change again: geographical implications for intercensal analysis. **Area**, v.26, n.2, p. 133-141, 1994.
- MCCRACKEN, S.; BRONDIZIO, E.; NELSON, D.; MORAN, E.F.; SIQUEIRA, A.; RODRIGUEZ-PEDRAZA, C. Remote sensing and GIS at farm property level: demography and deforestation in the Brazilian Amazon. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.11, p. 1311-1320, 1999.
- MCCRACKEN, S.; SIQUEIRA, A.D.; MORAN, E.F.; BRONDIZIO, E.S. Land Use Patterns on an Agricultural Frontier in Brazil. Insights and Examples from a Demographic Perspective. In: C. H. Wood e R. Porro. **Deforestation and Land Use in the Amazon**. Gainesville, Florida, University Press of Florida, 2002, p. 162-217.
- MCT, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Mosaico do Brasil**. 2003, INPE - DPI, <<http://www.dpi.inpe.br/mosaico/>>.
- MDA, MINISTERIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO -. **Controle Gerencial dos créditos - Implantação e Instalação 1993 a 1999**, INCRA - Superintendência Regional de Marabá SR-27, 2000.
- MDA, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO; INCRA, INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA; SR(27), SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DO SUL DO PARÁ. **Projetos de Assentamentos, Gerência Operacional de Sistemas (GSO) - Web e SIPRA4.0**. Marabá, 2003.
- MIRANDA, E. E. A floresta Urbanizada. **Revista Brasileira de Ecologia do Século XXI**, v.41, p. 9-10, 1999.
- MMA/SDS, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE / SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Projeto Cenários para a Amazônia Legal: Sistema de Consulta**. Sistematização e Atualização de Informações. Brasília - D.F., Consórcio ZEE-Brasil - CDROM, 2002.

- MONTE-MÓR, R.L.M. Health, the Environment and Urban-Rural Relations in Amazonia. In: M. Chatterji, M. Munasinghe e R. Ganguly. **Environment and Health in Developing Countries**. New Delhi, India, A.P.H. Pub. Corporation, 1998, p. 149-156.
- MORAN, E.F.; BRONDIZIO, E. Land-use change after deforestation in Amazonia. In: D. Liverman, E. F. Moran, R. Rindfuss e P. C. Stern. **People and Pixel. Linking Remote Sensing and Social Science**. Washington, D.C., National Academy Press, 1998, p. 94-120.
- MORAN, E.F.; BRONDIZIO, E.; MAUSEL, P.; WU, Y. Integrating Amazonian vegetation, land use, and satellite data. **Bioscience**, v.44, p. 329-338, 1994.
- MORAN, E.F.; SIQUEIRA, A.; BRONDIZIO, E. Household Demographic Structure and it's Relationship to the Amazon Basin. In: J. Fox, V. Mishra, R. Rindfuss e S. Walsh. **People and Environment: Approaches to Linking Household and Community Surveys to Remote Sensing and GIS**. Boston, Kluwer Academic Press, 2003, p. 1-30. Disponível em: <<http://www.indiana.edu/~act/docs/0301.pdf>>.
- MOREIRA, F.R.S. **Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas**. 2001. 140 p. Master Thesis - São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <[sputnik.dpi.inpe.br:1905](http://sputnik.dpi.inpe.br:1905)>
- MOURA, H. A. ; MOREIRA, M.M. A população da região norte: processos de ocupação e de urbanização recentes. **Trabalhos para Discussão**, n.112, p. 1-19, 2001. <[www.fundaj.gov.br/tpd](http://www.fundaj.gov.br/tpd)>.
- MUEHRCKE, P. **Population Slope Maps**. 1966. MA Thesis - Department of Geography. Ann Arbor, University of Michigan.
- NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A.C.; CARVALHO, G.; SANTILLI, M.; VERA DIAZ, M. C. Letters, reponse - "Issues in Amazonian development". **Science**, v.295, p. 1643-1644, 2002a.
- NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A.C.; CARVALHO, G.; SANTILLI, M.; VERA DIAZ, M. C. Frontier Governance in Amazonia. **Science**, v.295, p. 629-631, 2002b.
- OLIVEIRA, M.C.C.; SILVA, W.R.; SANTOS, W.A. **Estudo sobre o processo de migração de agricultores familiares na área rural da região de Marabá**, LASAT - Laboratório Sócio-Agrônômico do Tocantins, 2001. 46 p.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information System**, v.4, n.3, p. 313-332, 1990.
- OLORUNFEMI, J.F. Land use and population: A linking model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.50, n.2, p. 221-227, 1984.
- OPENSHAW, S. **The modifiable areal unit problem**. Norwich: Geo Books, 1984.
- PFAFF, A.S.P. What Drives Deforestation in the Brazilian Amazon?: Evidence from Satellite and Socioeconomic Data. **Journal of Environmental Economics and Management**, v.37, n.1, p. 26-43, 1999.

- PINA, M.F.R.P. **Aplicações e avaliação de técnicas de interpolação espacial para geração de superfícies de densidade a partir de dados populacionais em uma região do município do Rio de Janeiro**. 2001. 125 p. Tese (Doutorado) - Engenharia Biomédica, COPPE. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PLUTZAR, C.; GRÜBLER, A.; STOJANOVIC, V.; RIEDL, L.; POSPISCHIL, W. **A GIS-based Approach for Modeling the Spatial and Temporal Development of Night-time Lights**. 2000, Wichmann Verlag, Heidelberg, <<http://www.pph.univie.ac.at/vegoek/personal/plutzar/a2000.html>>.
- POTTER, C.; DAVIDSON, E.; NEPSTAD, D.; CARVALHO, C.R. Ecosystem modeling and dynamic effects of deforestation on trace gas fluxes in Amazon tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v.152, n.1-3, p. 97-117, 2001.
- POZZI, F.; SMALL, C. Exploratory Analysis of Suburban Land Cover and Population Density in the U.S.A. In: IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, **Proceedings**. Rome, Italy, 2001. p.250-254.
- PROARCO. **Acesso ao banco de dados dos focos de calor do satélite NOAA 12 e GOES 08**. 2003, DPI/CPTEC - INPE, <<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>>. Acesso em: 2003.
- REVENGA, C.; MURRAY, S.; ABRAMOVITZ, J.; HAMMOND, A. **Watersheds of the World: Ecological Value and Vulnerability**. Washington, D.C., World Research Institute, 1998.
- ROBERTS, D.A.; KELLER, M.; SOARES, J.V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, In Press. Available online 31 October 2003.
- SAATY, T. L. Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets. **Fuzzy sets and systems**, v.1, p. 57-68, 1978.
- SHERBININ, A.; BALK, D.; YAGER, K.; JAITEH, M.; POZZI, F.; GIRI, C.; WANNEBO, A. **A CIESIN Thematic Guide to Social Science Applications of Remote Sensing**. Palisades, NY, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) of Columbia University, 2002. 69 p. Disponível em: <[http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide\\_main.jsp](http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide_main.jsp)>.
- SPIEKERMANN, K.; WEGENER, M. Freedom from the Tyranny of Zones: Towards New GIS-based Spatial Models. In: F. A. S. W. M. **Spatial Models and GIS - New Potential and New Models**. London, Taylor & Francis, 2000, p. 45-61.
- SUDAM/PNUD. **Diagnóstico e Censarização Macrossocial da Amazônia Legal: Tendências Demográficas Recentes da Região Amazônica**. Belém, Ministério da Integração Nacional, 2001. 76 p.
- SUTTON, P. Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS. **Computer Environment and Urban Systems**, v.21, n.3/4, p. 227-244, 1997.
- SUTTON, P.; ROBERTS, D.; ELVIDGE, C.D.; MEIJ, H. A comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for the Continental United States. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.64, n.11, p. 1303-1313, 1997.

SYDENSTRICKER-NETO, J. Population and Environment in Amazonia: from just the numbers to what really counts. In: D. J. Hogan, E. Berquó e H. S. M. Costa. **Population and Environment in Brazil: Rio +10**. Campinas, CNPD, ABEP, NEPO, 2002, p. 54-75.

TOBLER, W.R. Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions. **Journal of the American Statistical Association**, v.74, n.367, p. 519-530, 1979.

TOBLER, W.R.; DEICHMANN, U.; GOTTSEGEN, J.; MALOY, K. **The Global Demography Project**. Santa Barbara, CA, National Center for Geographic Information and Analysis, 1995.

TURNER, A.; OPENSHAW, S. Disaggregative Spatial Interpolation. In: GISRUK, **Proceedings**. Glamorgan Wales, 2001. Disponível em: <[www.geog.leeds.ac.uk/staff/a.turner/papers/gisruk01/gisruk01.htm](http://www.geog.leeds.ac.uk/staff/a.turner/papers/gisruk01/gisruk01.htm)>. Acesso em:2000

VELDKAMP, A.; VERBURG, P.H.; KOK, K.; DE KONING, G.H.J.; SOEPBOER, W. Spatial explicit land use change scenarios for policy purposes: some applications of the CLUE framework. In: S. J. Walsh e K. A. Crews-Meyer. **Linking People, Place, and Policy. A GIScience Approach**. Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publishers, 2002, p. 317-341.

WEEKS, J. R.; GADALLA, M. S.; RASHED, T.; STANFORTH, J.; HILL, A. G. Spatial variability in fertility in Menoufia, Egypt, assessed through the application of remote-sensing and GIS technologies. **Environment and Planning A**, v.32, n.4, p. 695-714, 2000.

WEIER, J. **Bright Lights, Big City**, NASA's Earth Observatory, 2000.

WELCH, R. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.9, p. 1-9, 1980.

WELCH, R.; ZUPKO, S. Urbanized area energy patterns from DMSP data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.46, n.2, p. 201-207, 1980.

WOOD, C.H.; SKOLE, D. Linking Satellite, Census, and Survey Data to Study Deforestation in the Brazilian Amazon. **People and Pixel: Linking Remote Sensing and Social Science**. Washington, D.C, National Academy Press, 1998, p. 70-93.

YUAN, Y.; SMITH, R.M.; LIMP, W.F. Remodeling census population with spatial information from Landsat TM imagery. **Computer Environment and Urban Systems**, v.21, n.3/4, p. 245-258, 1997.

ZADEH, L.A. *Fuzzy Sets*. **Informat. Control**, v.8, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L.A. *Fuzzy Logic*. **Computer**, v.21, p. 83-92, 1988.

## APÊNDICE A

### Rotinas em IDL para gerar o mosaico de luzes noturnas DMSP/OLS

#### LUZFLAG

```

Pro luzflag
tempo = Systemtime(1)
linhas = 5641
colunas = 5641
mm = ['01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','$
      '02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','$
      '03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','$
      '04','04','04','04','04','04','04','04','$
      '05','05','05','05','05','05','05','05','05','05','05','$
      '06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','$
dd = ['08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18','$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','$
      '08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18','$
      '07','08','09','10','16','17','$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','$
      '05','06','07','08','09','10','11','12','13','14','15']
nrimg = N_Elements(mm)
imgout = Fltarr(colunas,linhas)
imgsn = Fltarr(colunas,linhas)
imgluz = Fltarr(colunas,linhas)
img = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img1 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
For i=0,nrimg-1 do Begin
  nome =
'D:\PrePro_DMSP\F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+'
.flg'
  Openr, arqlun, nome, /Get_Lun
  Readu, arqlun, img
  Free_lun, arqlun
  img1 = img
  h = Histogram(img1)
  indsns1 = Where((img1 eq 0) or (img1 eq 2), c02,complement=cindsns1)
  If(indsns1(0) ne -1) Then Begin
    img1(indsns1) = 1
    If(cindsns1(0) ne -1) Then img1(cindsns1) = 0
  EndIf
  imgsn = imgsn+img1

  incluz = Where(img eq 2, c2, complement=cindluz)
  If(incluz(0) ne -1) Then Begin
    img(incluz) = 1
    If(cindluz(0) ne -1) Then img(cindluz) = 0
  EndIf
  imgluz = imgluz+img
  img(*,*) = 0b
  img1(*,*) = 0b
EndFor
Openw,sennuv,'D:\PrePro_DMSP\semnuvem',/Get_Lun
Writeu,sennuv,imgsn
Free_Lun,sennuv
Openw,luzlun,'D:\PrePro_DMSP\imluz',/Get_Lun
Writeu,luzlun,imgluz
Free_Lun,luzlun
; Ao término deste programa, rodar em seqüência o programa Divisao.pro, a fim de gerar a
imagem ;percentagem de luz estáveis
Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de ',Systemtime(1)-
tempo,format='(A46,F10.2)'
print, 'FIM'
End

```

## DIVISAO

```

Pro Divisao,limiar,espaco
tempo = Systemtime(1)
linhas = 5641
colunas = 5641

imgout = Bytarr(colunas,linhas)
img = Fltarr(colunas,linhas)
imgsn = Fltarr(colunas,linhas)
imgluz = Fltarr(colunas,linhas)

Openr,sennuv,'D:\PrePro_DMSP\semnuvem',/Get_Lun
Readu,sennuv,imgsn
Free_Lun,sennuv

Openr,luzlun,'D:\PrePro_DMSP\imluz',/Get_Lun
Readu,luzlun,imgluz
Free_Lun,luzlun

Print, ' Imagens lidas ...'
ind = Where(imgsn gt espaco,cc2,complement=cind)
img(ind) = (Float(imgluz(ind))/Float(imgsn(ind)))*100

imgout = Byte(Floor(img+0.5))

Openw,perclun,'D:\PrePro_DMSP\luzperc',/Get_Lun
Writeu,perclun,imgout
Free_Lun,perclun

ind = Where(imgout lt limiar)
If (ind(0) ne -1) Then imgout(ind) = 0
name =
'D:\PrePro_DMSP\luzperc'+Strcompress(limiar,/remove_all)+'_'+Strcompress(espaco,/remove_all)
Openw,perclun,name,/Get_Lun
Writeu,perclun,imgout
Free_Lun,perclun

name = name+'.hdr'
Openw,lun,name,/Get_Lun
Printf,lun,'ENVI'
Printf,lun,'description = {Lat/Lon reprojection of DMSP-OLS data}'
Printf,lun,'samples = 5641'
Printf,lun,'lines = 5641'
Printf,lun,'bands = 1'
Printf,lun,'header offset = 0'
Printf,lun,'file type = ENVI Standard'
Printf,lun,'data type = 1'
Printf,lun,'interleave = bsq'
Printf,lun,'sensor type = Unknown'
Printf,lun,'byte order = 0'
Printf,lun,'map info = {Geographic Lat/Lon, 1, 1, -81, 12.025, 0.00833300, 0.00833300}'

Free_lun,lun

Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de ',Systemtime(1)-tempo,format=' (A46,F10.2) '

print, 'FIM'

End

```

## LUZCLOUD

```

Pro luzcloud
tempo = Systemtime(1)
linhas = 5641
colunas = 5641
dirin = 'D:\PrePro_DMSP\'

m = [01,01,01,01,01,01,01,01,01,01,01,01,$
      02,02,02,02,02,02,02,02,02,02,02,02,$
      03,03,03,03,03,03,03,03,03,03,03,03,$
      04,04,04,04,04,04,04,$
      05,05,05,05,05,05,05,05,05,05,$
      06,06,06,06,06,06,06,06,06,06,06]
d = [08,09,10,11,12,13,14,15,16,17,18,$
      07,08,09,10,11,12,13,14,15,16,17,$
      08,09,10,11,12,13,14,15,16,17,18,$
      07,08,09,10,16,17,$
      07,08,09,10,11,12,13,14,15,16,$
      05,06,07,08,09,10,11,12,13,14,15]

mm = ['01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01',$
      '02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02',$
      '03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03',$
      '04','04','04','04','04','04','04',$
      '05','05','05','05','05','05','05','05','05','05','05',$
      '06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','06']
dd = ['08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18',$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17',$
      '08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18',$
      '07','08','09','10','16','17',$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16',$
      '05','06','07','08','09','10','11','12','13','14','15']

nring = N_Elements(m)

img0 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img1 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img2 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img3 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img4 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)

For i=1,nring-2 do Begin
  If((Abs(d[i]-d[i-1]) eq 1) and (Abs(d[i]-d[i+1]) eq 1) and (m[i] eq m[i-1]) and (m[i]
eq m[i+1])) Then Begin
    img3(*,*) = 0
    img4(*,*) = 0
    nome0 = dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i-1),/remove_all)+Strcompress(dd(i-
1),/remove_all)+'.flg'
    Openr, 1, nome0
    Readu, 1, img0
    Close, 1
    nome1 =
dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+'.flg'
    Openr, 1, nome1
    Readu, 1, img1
    Close, 1
    nome2 =
dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i+1),/remove_all)+Strcompress(dd(i+1),/remove_all)+'.flg'
    Openr, 1, nome2
    Readu, 1, img2
    Close, 1

    Openw, 2,
dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+'.flg.old'
    Writeu, 2, img1
    Close, 2

hh=histogram(img1)
h2 = Where(img1 eq 2,cc)
print,'Imagem 1:', Where(hh ne 0),cc

```

```

temp = Where((img1 eq 1) or (img1 eq 3) or (img1 eq 5))      ; nuvem = 1
If(temp(0) ne -1) Then img3(temp) = 1
temp = Where(img0 eq 2, Complement=naoluz)                  ; luz = 2
If(temp(0) ne -1) Then Begin
  img0(temp) = 1
  img0(naoluz) = 0
EndIf
temp = Where(img2 eq 2, Complement=naoluz)                  ; luz = 2
If(temp(0) ne -1) Then Begin
  img2(temp) = 1
  img2(naoluz) = 0
EndIf

img4 = (img3 and img0) and img2
temp = Where(img4 eq 1,c4)
If(temp(0) ne -1) Then img1(temp) = 2
hh=histogram(img1)
h2 = Where(img1 eq 2,cn)
Openw, 2,
dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+' .flg'
Writeu, 2, img1
Close, 2
EndIf
EndFor

Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de',Systeme(1)-
tempo,format='(A46,F10.2) '
print, 'FIM'
End

```

## BINOMIAL

```

Pro binomial,sigma
tempo = Systeme(1)
linhas = 5641
colunas = 5641

imgout = Bytarr(colunas,linhas)
img = Fltarr(colunas,linhas)
imgsn = Fltarr(colunas,linhas)
imgluz = Fltarr(colunas,linhas)

Openr,sennuv,'D:\PrePro_DMSP\semnuvem',/Get_Lun
Readu,sennuv,imgsn
Free_Lun,sennuv

Openr,luzlun,'D:\PrePro_DMSP\impluz',/Get_Lun
Readu,luzlun,impluz
Free_Lun,luzlun

Print, ' Imagens lidas ...'

; N = número de trials          => semnuvem ou número de imagens
; m = número de sucessos        => impluz
; p = probabilidade de um sucesso => impluz/semnuvem (estimativa de p)
; A Média e a Variância de uma distribuição Binomial Bi(m,N,p) são:
; me = Np   var = Np(1-p)

N = 61
imgme = Fltarr(colunas,linhas)
imgsd = Fltarr(colunas,linhas)
imglim = Fltarr(colunas,linhas)
temp = Float(imgluz)/Float(imgsn)
imgme = temp*N
imgsd = Sqrt(temp*(1.-temp)*N)

name_med = 'D:\PrePro_DMSP\media_'+Strcompress(sigma,/remove_all)
Openw, plun, name_med,/Get_Lun
Writeu, plun, imgme

```

```

Free_Lun, plun

name_sd = 'D:\PrePro_DMSP\desvio_'+Strcompress(sigma,/remove_all)
Openw, plun, name_sd,/Get_Lun
Writeu, plun, imgsd
Free_Lun, plun

name_lim = 'D:\PrePro_DMSP\limite_'+Strcompress(sigma,/remove_all)
temp = Where(imgme gt sigma*imgsd,complement=cind)
If(temp(0) ne -1) Then Begin
    imglim(temp) = imgme(temp)
    imglim(cind) = 0
EndIf

imgout = Byte(Floor(imglim+0.5))

Openw, plun, name_lim, /Get_Lun
Writeu, plun, imgout
Free_Lun, plun

nomes=[name_med,name_sd,name_lim]
For i=0,2 do Begin
    name = nomes(i)+'.hdr'
    Openw, lun, name, /Get_Lun
    Printf, lun, 'ENVI'
    Printf, lun, 'description = {Lat/Lon reprojection of DMSP-OLS data}'
    Printf, lun, 'samples = '+ Strtrim(String(colunas), 2)
    Printf, lun, 'lines   = '+ Strtrim(String(linhas), 2)
    Printf, lun, 'bands   = 1'
    Printf, lun, 'header offset = 0'
    Printf, lun, 'file type = ENVI Standard'
    If (nomes(i) eq name_lim) Then Printf, lun, 'data type = 1' $
    Else Printf, lun, 'data type = 4'
    Printf, lun, 'interleave = bsq'
    Printf, lun, 'sensor type = Unknown'
    Printf, lun, 'byte order = 0'
    Printf, lun, 'map info = {Geographic Lat/Lon,1,1,-81,12.025,0.00833300,0.00833300}'
    Free_lun, lun
EndFor

Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de ',Systemtime(1)-
tempo,format='(A46,F10.2)'

print, 'FIM'

End

```

## TRANSICAO

```

Pro transicao
tempo = Systemtime(1)
linhas = 5641
colunas = 5641
dirin = 'D:\PrePro_DMSP\'
mm = ['01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','$
      '02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','$
      '03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','$
      '04','04','04','04','04','04','04','04','$
      '05','05','05','05','05','05','05','05','$
      '06','06','06','06','06','06','06','06','$
dd = ['08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18','$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','$
      '08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18','$
      '07','08','09','10','16','17','$
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','$
      '05','06','07','08','09','10','11','12','13','14','15']

nring = N_Elements(mm)
img0 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img0(*,*)=0
img1 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img1(*,*)=0
imgout = Fltarr(colunas,linhas,/nozero)
imgout(*,*)=0.0
transicao = [-1.,-2.,2.,1.]

For i=0,nring-2 do Begin
  nome0 =
  dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+'.flg'
  Openr, 1, nome0
  Readu, 1, img0
  Close, 1
  nome1 =
  dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i+1),/remove_all)+Strcompress(dd(i+1),/remove_all)+'.flg'
  Openr, 1, nome1
  Readu, 1, img1
  Close, 1

  ind02 = Where(img0 eq 2)
  img0(ind02) = 1
  ind12 = Where(img1 eq 2)

  img1(ind12) = 2
  temp = img0+img1
  For j=0,3 do Begin
    ind = Where(temp eq j)
    If(ind(0) ne -1) Then imgout(ind) = imgout(ind)+transicao(j)
  EndFor
EndFor

Openw, 2, dirin+'transicao_so2'
Writeu, 2, imgout
Close, 2
Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de ',Systemtime(1)-
tempo,format='(A46,F10.2)'
print, 'FIM'
End

```

## TRANSICAO1

```

Pro transicao1
tempo = Systemtime(1)
linhas = 5641
colunas = 5641
dirin = 'D:\PrePro_DMSP\'

mm = ['01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01','01',$,
      '02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02','02',$,
      '03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03','03',$,
      '04','04','04','04','04','04','04','04',$,
      '05','05','05','05','05','05','05','05','05','05','05',$,
      '06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','06','06']
dd = ['08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18',$,
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16','17',$,
      '08','09','10','11','12','13','14','15','16','17','18',$,
      '07','08','09','10','16','17',$,
      '07','08','09','10','11','12','13','14','15','16',$,
      '05','06','07','08','09','10','11','12','13','14','15']

nring = N_Elements(mm)
img0 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img0(*,*)=0
img1 = Bytarr(colunas,linhas,/nozero)
img1(*,*)=0
imgout = Fltarr(colunas,linhas,/nozero)
imgout(*,*)=0.0

transicao = [-2.,20.,-2.,-4.,18.,-4.,0.,20.,-3]

nrtran = N_Elements(transicao)

For i=0,nring-2 do Begin
  nome0 =
  dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i),/remove_all)+Strcompress(dd(i),/remove_all)+'.flg'
  Openr, 1, nome0
  Readu, 1, img0
  Close, 1
  nome1 =
  dirin+'F152002'+Strcompress(mm(i+1),/remove_all)+Strcompress(dd(i+1),/remove_all)+'.flg'
  Openr, 1, nome1
  Readu, 1, img1
  Close, 1

  ind2 = Where(img0 eq 2)
  If(ind2(0) ne -1) Then img0(ind2) = 1 ; luz na imagem0
  ind1 = Where(img0 eq 1)
  ind5 = Where(img0 eq 5)
  If(ind1(0) ne -1) Then temp1 = 0 Else temp1 = 1
  If(ind5(0) ne -1) Then temp5 = 0 Else temp5 = 2
  aa = temp1+temp5
  Case aa Of
    0: img0([ind1,ind5]) = 2 ; nuvem na imagem0
    1: img0(ind5) = 2
    2: img0(ind1) = 2
    3: print, 'Imagem sem nuvem alguma...'
  EndCase

  ind2 = Where(img1 eq 2)
  If(ind1(0) ne -1) Then img1(ind2) = 3 ; luz na imagem1
  ind1 = Where(img1 eq 1)
  ind5 = Where(img1 eq 5)
  If(ind1(0) ne -1) Then temp1 = 0 Else temp1 = 1
  If(ind5(0) ne -1) Then temp5 = 0 Else temp5 = 2
  aa = temp1+temp5
  Case aa Of
    0: img1([ind1,ind5]) = 6 ; nuvem na imagem1
    1: img1(ind5) = 6
    2: img1(ind1) = 6
    3: print, 'Imagem sem nuvem alguma...'

```

```
EndCase
soma = [0,3,6,1,4,7,2,5,8]
transicao = transicao(Sort(soma))
temp = img0+img1
For j=0,nrtran-1 do Begin
  ind = Where(temp eq j)
  If(ind(0) ne -1) Then imgout(ind) = imgout(ind)+transicao(j)
EndFor
EndFor

Openw, 2, dirin+'trans_so2_semnuvemh'
Writeu, 2, imgout
Close, 2
Print,'O tempo de processamento (em segundos) foi de ',Systemtime(1)-
tempo,format='(A46,F10.2) '
print, 'FIM'
End
```

*Assim como falham as palavras quando querem exprimir qualquer pensamento,  
Assim falham os pensamentos quando querem exprimir qualquer realidade.*

*Mas, como a realidade pensada não é a dita mas a pensada,  
Assim a mesma dita realidade existe, não o ser pensada.  
Assim tudo o que existe, simplesmente existe.  
(...)*

*Alberto Caeiro*