

Sensoriamento remoto para a caracterização intraurbana de cidades Amazônicas: uma abordagem classificatória híbrida para o caso da cidade de Santarém (PA)

Ana Paula Dal'Asta¹
Silvana Amaral¹
Antônio Miguel Vieira Monteiro¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{anapdalasta; silvana; miguel}@dpi.inpe.br

Abstract. Urbanization is a key issue when studying scenarios for sustainable development for the Amazonian region. This paper presents the potential of integrate multiresolution remote sensing data to analyze the intra-urban space of Santarém, western Pará (Brazil). First, the urban spatial patterns were identified by visual interpretation of a Landsat-TM5 image. These patterns were then used as input to classify intra-urban land cover of a SPOT-5 image based on object-based image analysis. Spectral information and textural and shape characteristics of image objects enabled to identify eight classes of land cover that were the base for characterization the urban patterns. An overall accuracy of 74% and a Kappa coefficient of 0.7 were obtained for the final classification. This SPOT classification revealed differences in the proportion of each land cover class composing each urban pattern, complementary to the first Landsat approach. Characterizing the intra-urban space of Amazon cities is a local but important part of the knowledge about the structure and organization of the Amazon urban territory. This paper provides a general methodology that could be extended to other regions and data sources, in order to provide useful information for urban planning and monitoring.

Palavras-chave: multiresolution remote sensing, object-based image analysis, urban patterns, Santarém.

1. Introdução

Na Amazônia brasileira, as cidades são elementos chave para o desenvolvimento e planejamento regional uma vez que concentram a população e constituem os nós das redes de relações (BECKER, 2005). Atualmente, com mais de 70% da população total residindo em áreas caracterizadas como urbanas (IBGE, 2010), a *floresta urbanizada* (BECKER, 1995) se estabeleceu e evidencia a necessidade de inserção da temática urbana, como questão central nas agendas para as políticas públicas no espaço regional (BECKER, 2013). Apesar disso, a Amazônia ainda é amplamente percebida como uma região rural e seu crescimento urbano tem sido entendido, na maior parte das vezes, como um recurso temporário (MONTE-MÓR, 2004).

Para auxiliar na compreensão da extensão do fenômeno urbano, as imagens de sensoriamento remoto constituem uma valiosa ferramenta e fonte de dados. A visão sinóptica e a periodicidade das imagens oferecem uma rápida, eficaz e coerente fonte de informações sobre o ambiente e a evolução da ocupação urbana em diferentes escalas: do global ao intraurbano (POWELL e ROBERTS, 2008). Nesse sentido, dados orbitais de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados, tanto na delimitação e avaliação da expansão e ocupação urbanas (JACQUIN et al., 2008; KARABURUN et al., 2010), quanto na identificação das características intraurbanas (PINHO et al., 2012; SALEHI et al., 2012). Para o oeste paraense, Dal'Asta et al. (2012) combinaram imagens multiresolução e informações de campo para a identificação e categorização dos núcleos urbanos com base em suas características intraurbanas.

Apesar da complexidade da paisagem urbana, para a classificação do espaço intraurbano, a análise de imagens baseada a objetos (*Object-based Image Analysis* - OBIA) é um método bem estabelecido (PINHO et al., 2012) gerando resultados satisfatórios, como destacado em vários estudos (PINHO et al., 2012; SALEHY et al., 2012; TEWOLDE e CABRAL, 2011; JACQUIN et al., 2007). A abordagem OBIA é utilizada tanto em imagens de alta resolução,

como IKONOS e QuickBird, para a classificação da cobertura do solo urbano (PINHO et al., 2012; SALEHY et al., 2012), como em imagens de menor resolução espacial, como SPOT e Landsat, na análise da expansão urbana (TEWOLDE e CABRAL, 2011; JACQUIN et al.; 2007).

Considerando a importância das zonas urbanas para a região amazônica, propomos a utilização de imagens Landsat TM-5 e SPOT-5 para a análise da ocupação urbana da cidade de Santarém (Pará - Brasil). Mais especificamente, este trabalho, inserido no escopo do *Projeto UrbisAmazônia*¹, tem como objetivo apresentar o potencial e a validade de uma abordagem de sensoriamento remoto orientada a objetos para a caracterização dos padrões de ocupação urbana. Propõe-se assim, o uso integrado de imagens de diferentes resoluções e de técnicas de processamento de imagens em que a interpretação visual dá suporte para a classificação digital baseada em objeto para caracterização de padrões urbanos.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

O município de Santarém está localizado no oeste do Estado do Pará, na confluência dos rios Amazonas e Tapajós, e abrange uma área de 22.886,761 km². Nos últimos 20 anos, o município apresentou um aumento de 29.518 habitantes observado especialmente nas áreas urbanas, onde a população passou de 180.018 habitantes em 1991 para 215.947 habitantes em 2010 (IBGE, 2010). Regionalmente, a cidade de Santarém constitui um importante centro de referência para o acesso a bens, serviços e equipamentos. Além disso, a presença do porto da Cargill e do Porto Municipal conferem à cidade o papel do nó da rede fluvial para o escoamento da produção de grãos do Estado de Mato Grosso (ESCADA et al., 2009), associada também à presença da BR-163 (Rodovia Cuiabá-Santarém).

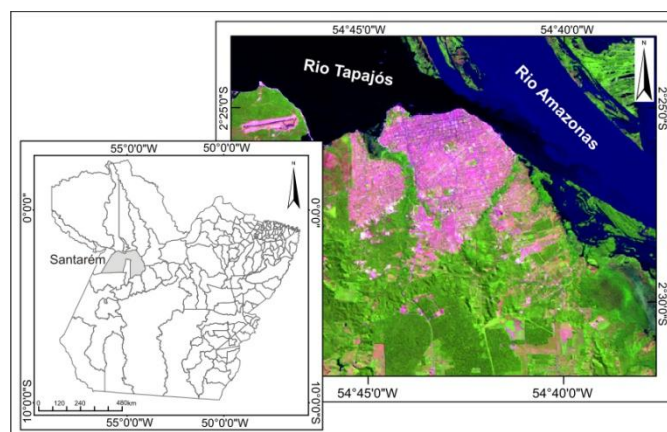


Figura 1. Localização do município de Santarém no oeste do Pará e a cidade de Santarém, na confluência dos rios Tapajós e Amazonas.

2.2. Procedimentos metodológicos






Dal'Asta et al (2013) propuseram a interpretação visual de imagens Landsat TM-5 na composição 345-BGR, como procedimento básico para identificar os padrões espaciais de ocupação urbana da cidade de Santarém, para os anos de 1990, 2000 e 2010. Densidade de ocupação, presença de vegetação e traçado urbano foram os principais critérios que definiram cinco padrões de ocupação urbana e um padrão de vegetação, conforme a Tabela 1. Neste trabalho, adotamos os padrões de ocupação urbana para o ano de 2010 e adaptamos o padrão

¹ Projeto UrbisAmazônia. Qual a Natureza do Urbano na Amazônia Contemporânea? *O Urbano Extensivo e os Circuitos da Economia: O Papel das Redes na Construção dos Lugares e na Configuração Multi-escala do Urbano Amazônico*. [http://www.dpi.inpe.br/urbisAmazonia]

associado a áreas não residenciais. Esse padrão, renomeado para *industrial*, refere-se às áreas com extração de areia e outros agregados para a construção civil, bastante significativas no entorno da área urbana.

Posteriormente, os padrões de ocupação, previamente mapeados, foram detalhados utilizando uma imagem SPOT-5/HRG2 cedida pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA) do estado do Pará. A imagem foi adquirida em 2011 e disponibilizada em uma banda sintética, fusionada e com tamanho do pixel de 2,5m. Transformação IHS (Intensidade, Matiz e Saturação) e operações aritméticas entre as bandas 1 e 3 foram aplicadas na imagem para gerar outras camadas de informação (PINHO et al., 2012), que foram utilizadas para classificar os objetos. As etapas para a caracterização dos padrões de ocupação consistiram em: definição de classes de cobertura da terra e suas chaves de interpretação, segmentação, seleção de atributos que descrevem os objetos, classificação e avaliação da classificação. Foi utilizado o Spring v.4.3.3 (Sistema de Processamento de Informação Georeferenciada) para pré-processar os dados, e o software e-CognitionTM para gerar informações adicionais, criar objetos, selecionar os atributos para a caracterização de cada classe e classificar a cobertura da terra.


Tabela 1. Tipologia dos padrões de ocupação urbana da cidade de Santarém.

| <i>Padrão</i> | <i>Tipologia</i> | <i>Descrição</i> |
|---|-------------------------------|---|
|  | <i>Ocupação adensada</i> | <i>> 80% de área construída; < 15% de vegetação; traçado urbano bem definido e presença de asfalto nas ruas; ocupação vertical.</i> |
|  | <i>Mediantemente adensada</i> | <i>60 – 80% de área construída; 10 - 30% de vegetação; traçado urbano definido.</i> |
|  | <i>Baixa densidade</i> | <i>30 – 60% de área construída; 30% - 60% de vegetação; traçado de ruas definido;</i> |
|  | <i>Expansão urbana</i> | <i><30% de área construída; 40% - 80% de vegetação; presença de ruas e significativas áreas de movimento de solo.</i> |
|  | <i>Áreas industriais</i> | <i>Extensas áreas não residenciais; ocupação com áreas industriais para extração especialmente de areia.</i> |

Fonte: Dal'Asta et al. (2013)

A caracterização dos padrões de ocupação foi baseada na classificação dos tipos de cobertura da terra presentes na área de estudo que podem ser identificados na imagem SPOT. Oito classes foram definidas com base na imagem fusionada e representam os tipos gerais de cobertura da terra intraurbana (Tabela 2). As classes intimamente ligadas à estrutura urbana, ou seja, aos espaços construídos, são: materiais brilhantes (telhados metálicos e amianto e outros materiais de alta refletância), materiais leves (telhado cerâmicos e outros materiais de cor clara) e materiais escuros (incluindo materiais de concreto, asfalto e outros materiais de cor escura). Essas classes incluem áreas de solo exposto, pois na cidade há muitas áreas com solo exposto que devido às características de composição do solo e às características da imagem a separabilidade é difícil.

Tabela 2. Classes de cobertura da terra identificadas na imagem SPOT.

| <i>Padrão na imagem</i> | <i>Classe</i> | <i>Descrição</i> |
|---|--------------------------|---|
|  | <i>Vegetação arbórea</i> | <i>Presença de árvores; textura rugosa; cor verde (variando de escuro para tons médios)</i> |

| | | |
|--|--|--|
|  | <i>Vegetação rasteira</i> | Presença de vegetação rasteira; cor verde (variando de escuro para tons claros); textura variando de um pouco rugosa para suave. |
|  | <i>Materiais brilhantes</i> | Textura suave; cor predominante branco; tamanho variável; forma, em geral, regular; áreas com solo exposto inclusas. |
|  | <i>Solo exposto – área com extração de areia</i> | Textura suave; cor branca; tamanho variável e forma irregular; localizada principalmente na borda da área urbana. |
|  | <i>Materiais claros</i> | Cor clara, com um amarelo variados tons de laranja; forma predominantemente regular; tamanho variável; áreas de solo exposto inclusas. |
|  | <i>Materiais escuros</i> | Cor variando de cinza claro a escuro; tamanho variável. |
|  | <i>Solo exposto</i> | Cor variando entre tons de vermelho e marrom; textura normalmente lisa. |
|  | <i>Sombra</i> | Cor quase preto; forma variável e tamanho predominantemente pequeno. |

Para segmentar a imagem, optou-se pelo algoritmo de segmentação multiresolução, que utiliza parâmetros de escala, cor/forma e suavidade/compacidade para controlar a criação dos objetos (BAATZ e SCHÄPE, 2000). Os parâmetros para a segmentação foram: escala (12), forma (0,4), para aumentar a influência da informação espectral em detrimento da forma final do objeto, e compacidade (0,5). O valor do parâmetro escala foi definido através de análise visual dos resultados de vários testes e das características, como tamanho dos objetos.

Após a segmentação, os objetos foram classificados hierarquicamente utilizando um conjunto de regras composto por informações espectrais e características de textura e forma dos objetos, conforme a Figura 2. As classes mais facilmente distinguíveis, tais como vegetação (intensidade baixa) e objetos de alto brilho e muito claros (brilho alto) foram colocadas no topo da classificação. Para as demais classes, utilizou-se a ferramenta *Feature Space Optimization*, disponível no software e-Cognition™, que a partir de um conjunto de atributos aponta a melhor combinação que proporciona maior separabilidade entre as classes (PINHO et al., 2012). Para essa análise, utilizou-se um conjunto de amostras de treinamento, com no mínimo 40 polígonos de cada classe, e testou-se 63 atributos. Foram necessários entre quatro e nove atributos para separar as classes no nível mais detalhado e a classificação foi efetuada utilizando a abordagem classificação hierárquica.

Os resultados da classificação foram avaliados visualmente e através do índice Kappa e da exatidão global, calculados a partir de uma amostra aleatória estratificada com 40 amostras por classe. Dados obtidos em levantamento de campo (DAL'ASTA et al., 2011) foram utilizados como dados auxiliares para descrever e avaliar os padrões urbanos.

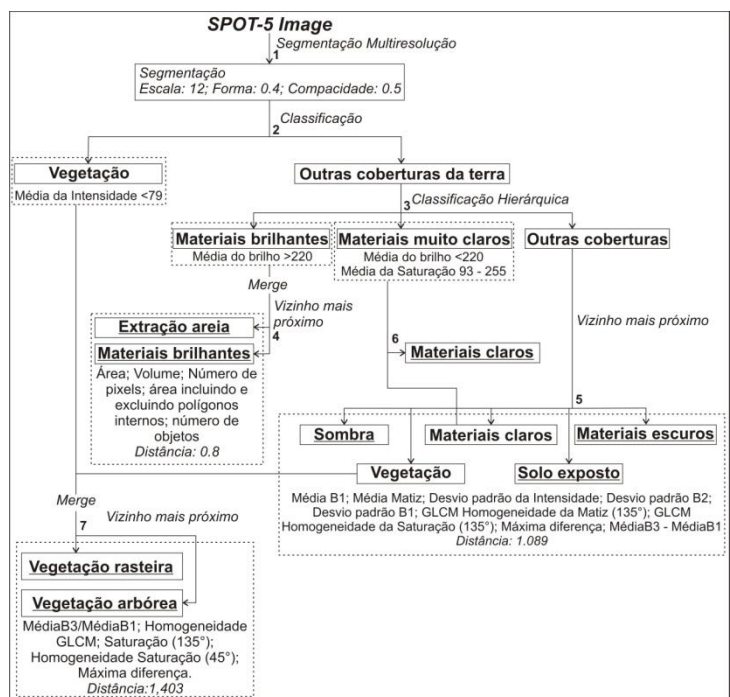


Figura 2. Conjunto de regras aplicadas à imagem SPOT para classificar a cobertura da terra urbana: classes intermediárias e temporárias (nomes em negrito); classes finais de cobertura da terra (negrito sublinhado); algoritmo utilizado na etapa (em itálico), e a ordem de execução do processo (números em negrito).

3. Resultados

O mapeamento dos padrões espaciais de ocupação urbana de Santarém, obtido por Dal’Asta et al. (2013) para o ano de 2010, é apresentado na Figura 3. Observa-se que a ocupação urbana, com 4.961,61 ha, não é contínua e se desenvolve em torno de três manchas, cuja expansão é orientada principalmente pelos eixos rodoviários da BR-163 e PA-370 (Rodovia Curuá-Una). Os padrões de ocupação mais significativos são *baixa densidade* e *expansão urbana*, elucidando a presença de áreas com alguma infraestrutura urbana de interesse para a o adensamento da ocupação. O centro e o seu entorno, cuja ocupação é mais antiga e infraestrutura urbana consolidada, correspondem às áreas com maior densidade de ocupação. As áreas mais significativas de vegetação estão associadas à presença de cursos d’água que constituem limitantes para a ocupação contígua da mancha urbana.

O resultado da classificação da cobertura da terra na cidade de Santarém é apresentado na Figura 4. De modo geral, os resultados obtidos foram satisfatórios com exatidão global de 0,74 e índice Kappa de 0,7. As classes materiais brilhantes e extração de areia obtiveram boa separabilidade e apresentaram confusões com a classe materiais claros. Observou-se que as classes sombra e solo exposto, devido a tonalidade, apresentaram confusão principalmente com as classes materiais escuros e vegetação arbórea. As classes de vegetação arbórea e vegetação rasteira também apresentaram confusões entre si, apesar da utilização de atributos de textura (GCLM Homogeneidade Saturação 45° e 135°) na classificação. Essas confusões estão associadas com as características da imagem.

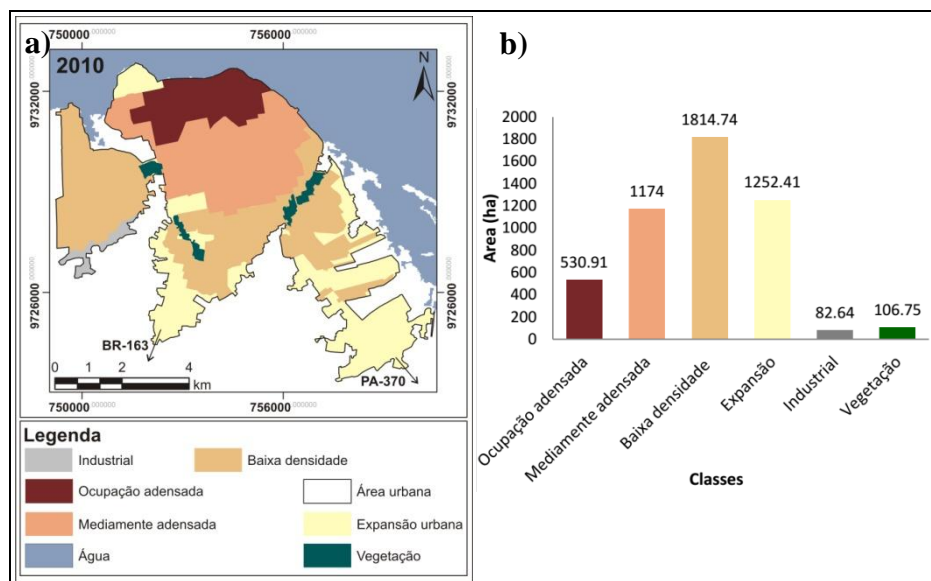


Figura 3. Resultados do mapeamento com imagens Landsat-TM5: a) padrões de ocupação urbana e de vegetação derivados da imagem; e b) área (ha) ocupada por cada padrão urbano. Fonte: Adaptado Dal'Asta et al. (2013)

Em termos de área, as classes mais significativas correspondem a materiais claros e vegetação arbórea, que ocupam em torno de 56% (2.825 ha) da área urbana. A classe materiais escuros também é significativa cobrindo uma área de 845 ha, em torno de 17% da área total. A área ocupada pelas classes materiais brilhantes, claros e escuros, que representam a estrutura urbana propriamente dita, corresponde a 2.923 ha (58,9%). As áreas com vegetação (arbórea e rasteira) ocupam 1.741 ha (34,4%) e estão localizadas principalmente na porção sudeste e sul da cidade, no eixo da rodovia PA-370 e BR-163, assim como as áreas de solo exposto (242.63 ha ou 4,9%) que também são significativas na porção oeste. Ressalta-se que essas áreas em muitos casos são mantidas esperando valorização, bem como estão associados à presença de sitiantes, com a presença de alguns cultivos nos lotes.

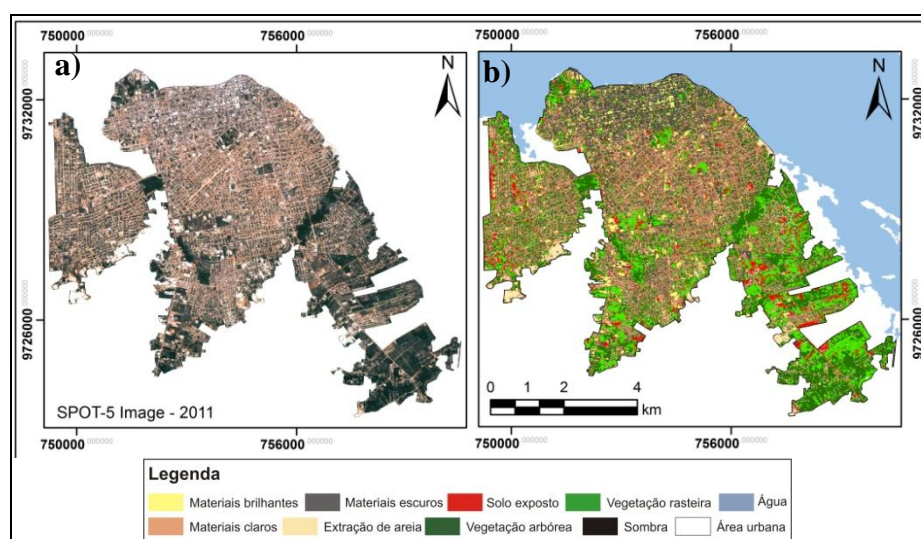


Figura 4. Resultados da classificação da imagem SPOT-5: a) imagem SPOT-5 da área urbana de Santarém; b) mapeamento da cobertura da terra intraurbana.

Relacionando os padrões de ocupação urbana com a cobertura da terra observa-se (Figura 5), que as diferentes classes se articulam de forma diferenciada em cada padrão, ou

seja, os padrões de ocupação estão associados com diferentes arranjos de cobertura da terra. Os padrões de ocupação *adensada* e *mediamente adensada* tem a maior proporção de ocupação urbana: mais de 80% (83,3% e 81%, respectivamente), e menos de 15% de áreas com vegetação. Contudo, no padrão de ocupação *adensada* a classe predominante é materiais escuros, cobrindo quase 47% desse padrão, enquanto materiais claros é a principal classe no padrão de ocupação *mediamente adensada* cobrindo 52,2% desse padrão.

No padrão de ocupação *baixa densidade*, a classe majoritária também é materiais claros, porém as áreas de vegetação são significativas e correspondem a mais de 30%. Nesse padrão, a ocupação urbana é de 60,5%. Nas áreas definidas como *expansão urbana* a vegetação, arbórea ou rasteira, ocupa quase 61%, o que representa 426,43 ha ou 41% da área total da classe de vegetação arbórea e 334,75 ha ou 51% da área total da vegetação rasteira. Ressalta-se que nos outros padrões as áreas com vegetação ocorrem principalmente nos fundos dos terrenos ou em parques e praças. Assim como a vegetação, as áreas de solo exposto também estão concentradas nos padrões com menores densidades de ocupação, especialmente no padrão baixa densidade cobrindo 110,53ha ou 45% da área total da classe.

O padrão *industrial* está associado às áreas de solo exposto com extração de areia localizadas no entorno da área urbana e voltadas para a construção civil, especialmente como matéria-prima das olarias presentes na cidade. Essas áreas com extração de areia não se restringem apenas ao padrão industrial, ocorrendo também nos padrões expansão urbana (9,02ha) e baixa densidade (15,49ha). Vale destacar que áreas de materiais escuros e brilhantes com tamanho grande e localizadas principalmente próximas as rodovias também correspondem a estabelecimentos industriais.

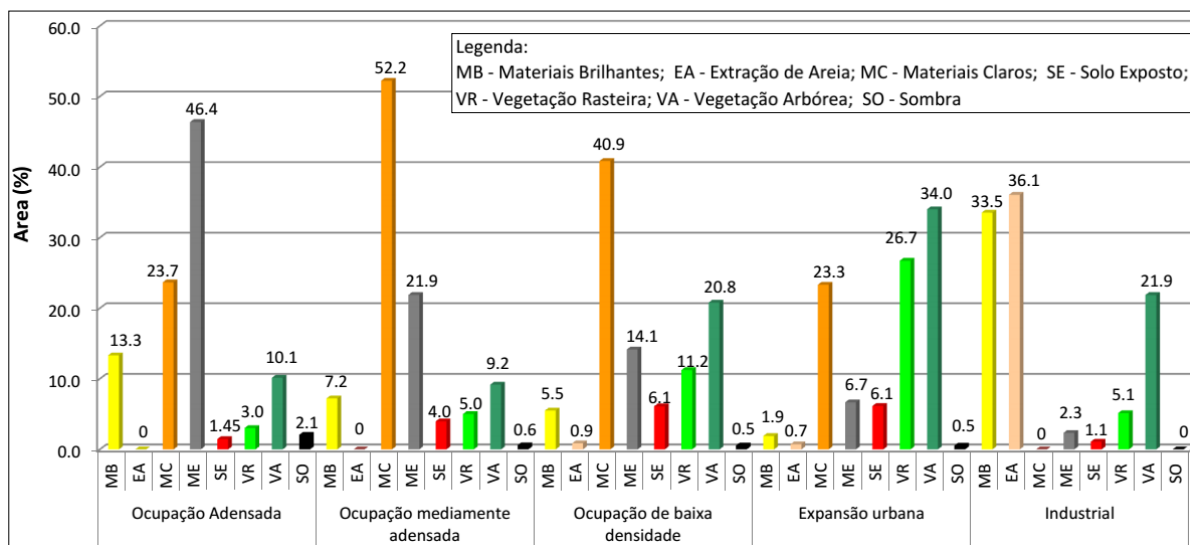


Figura 5. Área ocupada por cada classe de cobertura da terra em cada padrão de ocupação urbano.

5. Conclusões

A classificação e caracterização da ocupação em áreas urbanas é uma ferramenta útil para observar e identificar a estrutura e organização dessas áreas. Para a cidade de Santarém, a classificação de imagens SPOT possibilitou o refinamento dos padrões gerais de ocupação identificados em imagens de média resolução com a identificação de oito classes de cobertura da terra. Em geral, os padrões espaciais urbanos representam diferentes arranjos entre as classes de cobertura da terra. Apesar de identificar esses arranjos em cada padrão, no trabalho não foi possível caracterizar o tipo de ocupação, que requer descrições de campo e dados populacionais.

A abordagem baseada em objeto permitiu discriminar as classes de cobertura da terra intraurbana de forma satisfatória, em uma área relativamente grande e utilizando uma imagem processada. O uso de atributos de forma e textura, além de informações espectrais, auxiliou na discriminação de classes. Contudo, ressalta-se que para uma classificação mais detalhada e precisa dos alvos urbanos é necessário imagens de alta resolução e com as bandas espectrais originais.

Estudos como este que visam entender como o espaço urbano é caracterizado são de grande importância para a compreensão da natureza do urbano na Amazônia e definição das características e particularidades associadas às cidades. A abordagem utilizada neste estudo pode ser expandida para outros núcleos urbanos na Amazônia, a fim de obter uma maior compreensão dos processos envolvidos na expansão e consolidação dessas áreas para, então fornecer subsídios para a tomada de decisão dos gestores públicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Secretaria de Meio Ambiente do estado do Pará (SEMA) e o Centro Regional Amazônia (CRA) pela imagem SPOT e a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa para um dos autores.

6. Referências bibliográficas

- Baatz, M., Schäpe, A., 2000. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl, Blaschke, Griesebner (Eds.), **Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII**. Wichmann-Verlag, Heidelberg, pp. 12–23.
- Becker, B. K. Undoing Myths: The Amazon - An Urbanized forest. In: Clüsener, G. M.; Sachs, I. (Ed.). **Brazilian Perspectives on sustainable development of the Amazon region** - Man and Biosphere Series. v. 15. Paris: UNESCO and Parthenon Publish Group Limited, 1995, p. 53-89.
- Becker, B. K.. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.
- BECKER, B. K. **A Urbe Amazônica: entre a floresta e a cidade**. Rio de Janeiro: Garamond, 2013.
- Dal'Asta, A. P.; Gavlak, A. A.; Escada, M. I. S.; Brigatti, N.; Amaral, S. **Núcleos de ocupação humana e usos da terra entre Santarém e Novo Progresso, ao longo da BR-163 (PA)**. Relatório técnico de atividade de campo. INPE, São José dos Campos, 64 p. 2011
- Dal'Asta, A. P.; Brigatti, N.; Amaral, S.; Escada, M. I. S.; Monteiro, A. M. V. Identifying Spatial Units of Human Occupation in the Brazilian Amazon Using Landsat and CBERS Multi-Resolution Imagery. **Remote Sensing**, v.4, p.68-87, 2012; doi:10.3390/rs4010068
- Dal'Asta, A. P.; Escada, M. I. S.; Amaral, S.; Monteiro, A. M. V. Evolução do arranjo espacial urbano e das terras agrícolas no entorno de Santarém (Pará) no período de 1990 a 2010: Uma análise integrada baseada em sensoriamento remoto e espaços celulares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013a, p.7040-7047.
- ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S.; RENNÓ, C. D.; PINHEIRO, T. F. **Levantamento do uso e cobertura da terra e da rede de infra-estrutura no distrito florestal da BR- 163**. São José dos Campos: INPE, 2009. 52 p. (INPE-15739-RPQ/824).
- Jacquín, A.; Misakova, Lucia; Gaya, M. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. **Landscape and Urban Planning**, n. 84, pp. 152–165, 2008.
- Karaburun, A.; Demirci, A.; Suen, I. Impacts of urban growth on forest cover in Istanbul (1987–2007). **Environ. Monit. Assess.**, n.166, p. 267-277, 2010.
- MONTE-MÓR, R. L. de M. **Modernities in the Jungle: Extended Urbanization in the Brazilian Amazon**, unpublished Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles (UCLA), 2004.
- Salehi, B.; Zhang, Y.; Zhong, M.; Dey, V. Object-Based Classification of Urban Areas Using VHR Imagery and Height Points Ancillary Data. **Remote Sensing**, v.4, p. 2256-2276, 2012; doi:10.3390/rs4082256
- Pinho, C. M. D. de; Fonseca, L. M. G. F.; Korting, T. S.; Almeida, C. M. de; Kux, H.J. H. Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution images and object-based image analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 10, p. 5973–5995, 2012.
- Powell, R.L.; Roberts, D.A. Characterizing Variability of the urban physical environment for a suite of cities in Rondônia, Brazil. **Earth Interact.** 12, p. 1-32, 2008.
- Tewolde, M. G.; Cabral, P. Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea. **Remote Sensing**, v.3, p. 2148-2165. 2011; doi:10.3390/rs3102148