

MÉTODOS COGNITIVOS DE CLASSIFICAÇÃO APLICADOS A IMAGENS QUICKBIRD PARA A DETECÇÃO DE ÁREAS RESIDENCIAIS HOMOGÊNEAS

Cláudia Maria de Almeida¹
Iris de Marcelhas e Souza¹
Claudia Alves Durand¹
Carolina Moutinho Duque de Pinho¹
Raul Queiroz Feitosa²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – Divisão de Processamento de Imagens
Av. dos Astronautas, 1758 – 12227-010 São José dos Campos, SP
{almeida, iris, durand}@dsr.inpe.br; {carolina}@dpi.inpe.br

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ
Departamento de Engenharia Elétrica
R. Marquês de São Vicente, 225 – 22453-900 Rio de Janeiro, RJ
raul@ele.puc-rio.br

RESUMO

Este trabalho dedica-se a explorar métodos cognitivos de classificação de imagens QuickBird, visando detectar áreas residenciais homogêneas. A área de estudo localiza-se em um setor sul da cidade de São José dos Campos, São Paulo. Por meio de uma abordagem baseada em segmentação multinível e de uma rede hierárquica de classificação com seis níveis, identificaram-se áreas residenciais homogêneas em termos de densidade de ocupação e de grau de aproveitamento do terreno por parte das edificações, isto é, residências unifamiliares ou edifícios. A rede de classificação utilizou atributos espectrais, geométricos e topológicos dos objetos (ou regiões) em cada nível de segmentação, bem como suas características contextuais e semânticas de relacionamento entre os distintos níveis hierárquicos. A classificação final de unidades residenciais homogêneas foi submetida a um processo de validação, utilizando-se um índice de concordância *Kappa* baseado em objetos.

Palavras chaves: Métodos cognitivos, imagens de alta resolução, redes hierárquicas, áreas residenciais homogêneas.

ABSTRACT

This paper is committed to explore object-based methods for the classification of QuickBird images, aiming to detect homogeneous residential areas. The study area concerns the southern sector of São José dos Campos city, located in the State of São Paulo, Brazil. By means of a multi-resolution segmentation approach and a six-layer hierarchical classification network, homogeneous residential areas were identified in terms of density of occupation and building standards (single dwelling units or high-rise buildings). The classification network was built upon spectral, geometrical, and topological features of the objects in each level of segmentation as well as upon their contextual and semantic interrelationships in-between the hierarchical levels. The final classification of homogeneous residential units was subject to validation, using an object-based *Kappa* statistics.

Keywords: Knowledge-based methods, high resolution images, semantic networks, homogeneous residential areas.

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, dados de sensoriamento remoto vêm sendo empregados para fins de análises

mais detalhadas de áreas urbanas e, especificamente, de áreas residenciais urbanas. Atualmente, imagens de alta resolução espacial constituem-se em poderosas aliadas para essas análises, não somente por oferecerem uma

vasta riqueza de detalhes sobre a cena urbana (DONNAY et al., 2001; CENTENO et al., 2003), mas também, e sobretudo, pelo fato de que as plataformas computacionais baseadas em conhecimento e orientação a objeto, especialmente dedicadas a explorar tais imagens, descortinam um amplo rol de novas possibilidades para o universo metodológico de estudos do ambiente urbano.

Os sensores orbitais de elevada resolução espacial conjugados às plataformas cognitivas de interpretação de imagens permitem a discriminação mais detalhada de alvos urbanos, como a diferenciação de materiais de pavimentação viária e de cobertura, a exemplo de telhados metálicos, cerâmicos e lajes de concreto, novos ou envelhecidos, e de formas distintas de cobertura vegetal urbana, como vegetação arbórea e rasteira.

O uso desses dados detalhados de modo contextualizado, isto é, avaliados no seu conjunto, pode fornecer informações valiosas sobre o espaço intra-urbano, possibilitando a evolução de análises restritas a um estágio de simples caracterização da cobertura do solo urbano para análises mais aprofundadas, que dizem respeito ao uso do solo urbano propriamente dito. Em outras palavras, diferentes combinações de materiais de telhados de edificações e de cobertura vegetal urbana podem indicar a presença, por exemplo, de uma área industrial, ou então, de uma área residencial de baixo, médio ou alto padrão econômico, ou ainda, de uma área institucional.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a identificação de áreas residenciais homogêneas, levando em consideração seus aspectos biofísicos, como altura das edificações, tipo do material empregado para a cobertura, percentual e tipologia de áreas verdes, para, com isso, inferir seu padrão econômico e de tipologia habitacional (uni ou multifamiliar, assentamentos informais). A detecção do padrão e tipologia, que corresponde a uma dada área residencial homogênea, é obtida por meio de uma abordagem cognitiva baseada em segmentação multinível e classificação orientada a objeto, conforme exposto nas seções que seguem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maioria dos estudos urbanos baseados em imagens orbitais de elevada resolução espacial e análise orientada a objeto concentra-se na exploração de informações acerca da cobertura do solo (ZENG et al., 2002; SCHACKELFORD e DAVIS, 2003; MOELLER e BLASCHKE, 2006; DURIEUX et al., 2008).

Recentemente, surgiram iniciativas para a extração de informações em imagens de alta resolução espacial visando à discriminação de aspectos relativos ao uso do solo urbano, em particular, ao uso do solo residencial. Um estudo nessa linha foi realizado por ZHAN et al. (2000), no qual os autores diferenciaram os usos residencial, comercial e de áreas verdes para o bairro de Bijlmer, em Amsterdã, Holanda. Para tanto, os autores utilizaram uma metodologia consagrada de

mapeamento do uso do solo urbano a partir da composição de diferentes tipos de cobertura do solo. Cada uso foi identificado com base na densidade de áreas construídas (incluindo edificações, caminhos de pedestres e calçadas), bem como na proporção de áreas vegetadas e corpos d'água, existentes nas diferentes regiões ou segmentos da imagem. A classificação de cobertura do solo foi feita pixel a pixel, por meio do classificador supervisionado *maxver* ou de máxima verossimilhança, sobre uma imagem SPOT 4. Em seguida, foi conduzida uma segmentação manual da cena, com base em elementos lineares, como estradas, ferrovias, linhas de metrô de superfície, de modo a delimitar áreas homogêneas para a classificação de uso do solo urbano. Para a atribuição de usos do solo aos segmentos, foram utilizadas funções *fuzzy* referentes a cada tipo de cobertura do solo, as quais foram customizadas em função das características particulares encontradas em cada categoria de uso. Por exemplo, o uso residencial implica uma densidade de área construída comparativamente menor que o uso comercial e, ao mesmo tempo, uma proporção consideravelmente maior de áreas vegetadas, e assim por diante. Regras *fuzzy* de classificação foram estabelecidas com base no conjunto de dados amostrais para cada uso do solo, e cada segmento da imagem foi atribuído ao uso para o qual o seu valor de pertinência *fuzzy* era máximo.

ZHAN et al. (2001) deram seqüência ao trabalho acima descrito, no sentido de explorar formas mais sofisticadas de segmentação e de conceber uma gama maior de atributos para a classificação de uso do solo urbano. Os autores conduziram experimentos para a segmentação de tipos de cobertura do solo, porém não chegaram a executar a classificação de uso propriamente dita, limitando-se a propor uma metodologia para tal. De acordo com essa concepção, o uso do solo urbano pode ser inferido com base na informação de cobertura do solo, disponível em níveis semânticos mais elevados (de resolução espacial mais fina), não de forma direta, mas sim por meio da análise da distribuição e do padrão de configuração espacial das distintas classes de cobertura do solo. Para a segmentação de tipos de cobertura, como edifícios e corpos d'água, foram utilizados dados aerotransportados de perfilamento a laser. Para a delimitação de áreas vegetadas, foi aplicado o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) sobre imagens IKONOS. Para a segmentação destinada à classificação de uso do solo, os autores propuseram a utilização de morfologia matemática, a qual permite delimitar quadras através da identificação de vias. Como atributos para a classificação de uso, os autores sugerem três grandes grupos: i) numéricos e categóricos, ii) geométricos, e iii) estruturais. O primeiro inclui o número, tamanho médio e densidade de edificações, bem como o percentual de áreas verdes; o segundo, a localização, tamanho, forma e orientação das edificações; e o terceiro, aspectos relativos à distribuição espacial dos tipos de cobertura, p.ex., se isotrópica ou concentrada. Esses atributos

seriam combinados através de classificadores por lógica *fuzzy*, vizinho mais próximo ou árvore de decisão.

Contemporaneamente ao trabalho anterior, BAUER e STEINNOCHER (2001) dedicaram-se a explorar, na plataforma Definiens®, métodos de interpretação orientada a objeto e lógica *fuzzy* para identificar diferentes usos do solo urbano (residencial, industrial, comercial, esportivo, sistema viário etc.), chegando a diferenciar duas classes de uso residencial: com e sem áreas ajardinadas. A região estudada compreende um setor da área metropolitana de Viena, Áustria, e como dado de entrada, foi utilizada uma imagem fusionada pelo método AIF (Fusão de Imagem Adaptativa) entre as bandas multiespectrais e a pancromática do IKONOS. De forma semelhante a estudos anteriores, os autores inicialmente extraíram os principais tipos de cobertura do solo presentes na cena, por meio do classificador *maxver*. Um *layer* vetorial de vias foi usado para diferenciar materiais de pavimentação e de cobertura com respostas espectrais semelhantes. Em uma etapa seguinte, essa informação foi analisada em um contexto espacial, por meio de um modelo de grafos, considerando a distribuição e o padrão espacial dos tipos de cobertura, de modo a discriminar os distintos usos do solo existentes na imagem.

Outro trabalho destinado a identificar classes de uso do solo urbano foi realizado por WU et al. (2006), no qual os autores discriminaram, para a cidade de Austin, Texas, EUA, as áreas industriais, comerciais, além de seis tipologias de uso do solo residencial: residência unifamiliar I e II, residência multifamiliar I e II, casa móvel ou trailer I e II. As nomenclaturas I e II referem-se a diferenças nos padrões das edificações, como material de cobertura, densidade espacial das edificações, arranjo espacial das áreas verdes entre as construções etc. De forma diversa dos trabalhos precedentes, os autores utilizaram fotografia aérea digital multiespectral e análise de semivariograma para a identificação das classes de uso. A princípio, os autores usaram classificação espectral convencional para diferenciar as classes edificações e não-edificações. A partir daí, a imagem contendo essas duas classes foi binarizada, sendo o valor 1 atribuído aos pixels de edificações, e 0 aos demais. Várias bandas foram então geradas com base na análise de textura da imagem binária por meio de semivariograma, o qual foi utilizado para descrever o padrão espacial da presença de edificações. Por fim, uma classificação supervisionada foi conduzida com base nas várias bandas de textura de forma a produzir um mapa final de uso do solo urbano.

HEROLD et al. (2003) também utilizaram informações de textura, porém associadas a métricas espaciais (dimensão fractal, contágio, coesão etc.), as quais foram aplicadas a imagens IKONOS, com fins à classificação orientada a objeto de distintos usos do solo em Santa Barbara, CA, EUA. Neste trabalho, discriminaram-se as áreas residenciais multifamiliares e as unifamiliares de baixa, média e alta densidade.

Em outra abordagem destinada à extração de

usos do solo urbano, STOW et al. (2007) aplicaram métodos de classificação orientada a objeto e segmentação multinível a uma imagem QuickBird da cidade de Accra, em Gana, África, para diferenciar áreas não-residências de residenciais. Os autores empregaram duas estratégias de classificação: uma baseada na textura dos dados multiespectrais, e outra nas proporções de subobjetos pertencentes às classes de vegetação, cobertura impermeável e solo, sendo que em ambos os casos as áreas residenciais foram classificadas em baixo e alto padrão socioeconômico.

É válido ressaltar que em nenhum dos trabalhos apresentados anteriormente houve a discriminação de usos residenciais com base em categorias que considerassem conjuntamente aspectos de tipologias habitacionais (unifamiliar, multifamiliar, assentamentos informais) e de padrão econômico. Este artigo apresenta uma abordagem metodológica pioneira para a identificação de áreas residenciais homogêneas, tanto do ponto de vista econômico quanto de tipologia habitacional, por meio de um modelo cognitivo multinível desenvolvido na plataforma Definiens. Este modelo baseou-se em segmentação multiresolução (BAATZ e SCHÄPE, 2000) e classificação orientada a objeto de uma imagem QuickBird, através de lógica *fuzzy*. Informações sobre as particularidades dos alvos encontrados na cena urbana bem como sobre os atributos empregados para essa abordagem de classificação cognitiva serão fornecidas a seguir.

3. ÁREA DE ESTUDO

O município de São José dos Campos está localizado no estado de São Paulo, nas coordenadas 46°06'O, 23°18'S, 45°40'O e 22°49'S. Sua área total é de 1.099,60 km², e sua população, segundo o Censo 2000, é de 539.313 habitantes, dos quais 532.717 (98,78 %) vivem em áreas urbanas. O município está situado ao longo da rodovia Presidente Dutra, que conecta as duas maiores metrópoles do país: São Paulo e Rio de Janeiro, e é conhecido por ser o pólo aeroespacial brasileiro. As áreas residenciais da cidade apresentam padrões espaciais diversificados, os quais efetivamente correspondem ao padrão econômico de seus moradores. Observa-se que quanto mais elevado o padrão de uma dada vizinhança, maior será o seu percentual de áreas verdes (arborizadas e/ou gramadas) e, portanto, menor a sua densidade de ocupação. No presente trabalho, somente uma porção do setor sul da cidade será investigada. Essa área de estudo, apesar de possuir tamanho reduzido em relação a toda a área urbana de São José dos Campos, apresenta uma grande diversidade de categorias de áreas residenciais, incluindo edifícios e residências unifamiliares de diferentes padrões. Além disso, a área apresenta três favelas, as quais constituem uma categoria específica de área residencial homogênea.

4. METODOLOGIA

4.1 Construção do banco de dados

Cinco bandas de uma imagem QuickBird foram usadas no banco de dados desta pesquisa: uma

pancromática, com resolução de 0,67 m, e quatro bandas multiespectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) com 2,40 m de resolução. A data

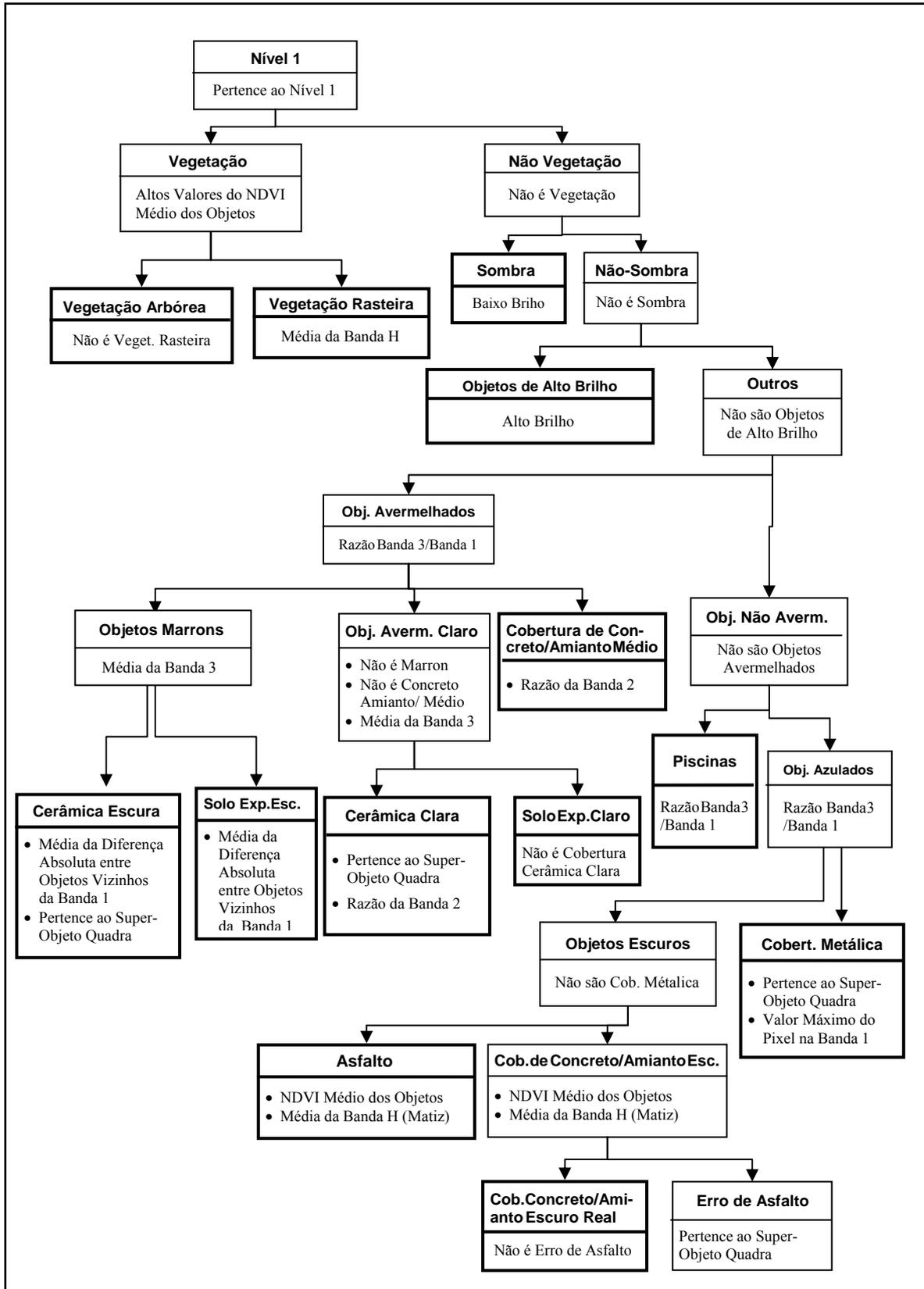


Fig. 1 - Rede hierárquica de classificação do Nível 1 e respectivos atributos para cada classe. Fonte: PINHO (2005).

de aquisição da imagem é 17 de maio de 2004, e ela apresenta um ângulo de visada lateral de 7,0° e resolução radiométrica de 16 bits, embora o nível de cinza dos pixels esteja de fato distribuído dentro de um intervalo de 11 bits.

As bandas multiespectrais foram fusionadas com a pancromática pelo método de principais componentes. Além da imagem, um *layer* vetorial referente ao sistema viário da área de estudo (em formato shape file) foi inserido no banco de dados. Esse *layer* foi usado para a segmentação inicial de vias e quadras, o qual orientou as segmentações dos demais níveis do banco de dados.

Para a classificação da cobertura do solo urbano da área de estudo, isto é, materiais de telhados, pavimentação de vias, sombra, áreas arborizadas e gramadas, estruturou-se o banco de dados em três níveis de segmentação (PINHO, 2005), da seguinte forma: (i) Nível 3 – segmentado de acordo com um *layer* de SIG correspondente ao sistema viário da área de estudo, com fator de escala de 10.000; (ii) Nível 2 – segmentado após o Nível 3, com fator de escala de 50; e (iii) Nível 1 – segmentado após o Nível 2, com um fator de escala muito fino, da ordem de 20. O fator de escala é um parâmetro interno do Definiens, estabelecido pelo usuário de forma heurística para cada nível de segmentação.

A classificação do Nível 3 corresponde, portanto, a vias e quadras; o Nível 2, por sua vez, foi classificado em vegetação, sombra e áreas construídas/solo exposto; e, finalmente, a classificação do Nível 1 se refere à cobertura do solo urbano (figuras 1 e 2), incluindo: vegetação arbórea, vegetação rasteira, sombra, asfalto, solo exposto claro e escuro, telhado de

cerâmica clara e escura, coberturas de concreto e cimento amianto escurecidos, coberturas de concreto e cimento amianto de tom médio, objetos de alto brilho (que incluem coberturas de concreto claro), coberturas metálicas e piscinas.

Apenas um atributo geométrico foi necessário para diferenciar vias de quadras no Nível 3: o ajuste retangular. No Nível 2, a classe sombra foi definida como uma função do brilho dos objetos; vegetação foi identificada por meio do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) dos objetos, e áreas construídas foram classificadas pela mútua exclusão das duas primeiras classes.

Cada um dos atributos do Nível 1 apresenta uma função de pertinência *fuzzy*, construída a partir de amostras coletadas na imagem. Algumas das curvas são contínuas, e outras, rígidas (*crisp*). É válido mencionar que os objetos dos Níveis 2 e 3 (figura 3a e 3b) foram decisivos para a classificação do Nível 1.

4.2 Definição das áreas residenciais homogêneas e seus respectivos atributos

Para se classificar as áreas residenciais da cidade em unidades homogêneas, as quadras tiveram de ser inicialmente subclassificadas em residenciais e não-residenciais. Isto foi feito no Nível 5, com segmentação idêntica ao Nível 3, e de forma manual, uma vez que o Departamento de Planejamento da Prefeitura de São José dos Campos não dispunha desses dados em formato digital. Ademais, algumas áreas residenciais ocupavam apenas parte das quadras, e por isso foi necessária uma edição vetorial, de forma a subdividir as quadras em áreas residenciais e não-residenciais.

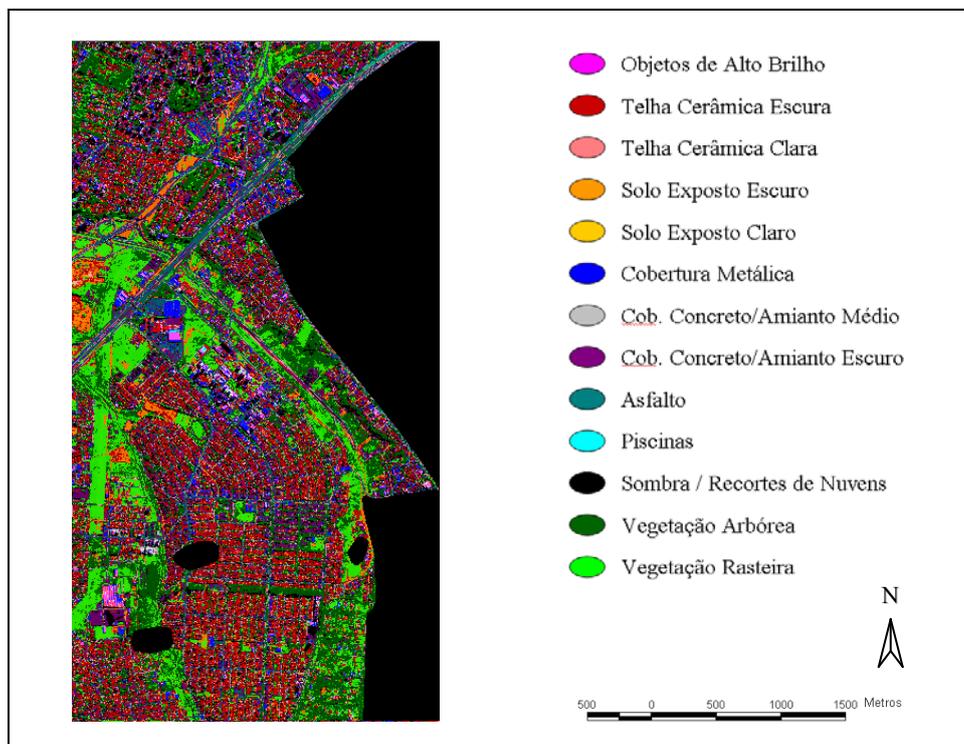


Fig. 2 – Classificação do Nível 1 - Cobertura do solo urbano. Fonte: PINHO (2005).

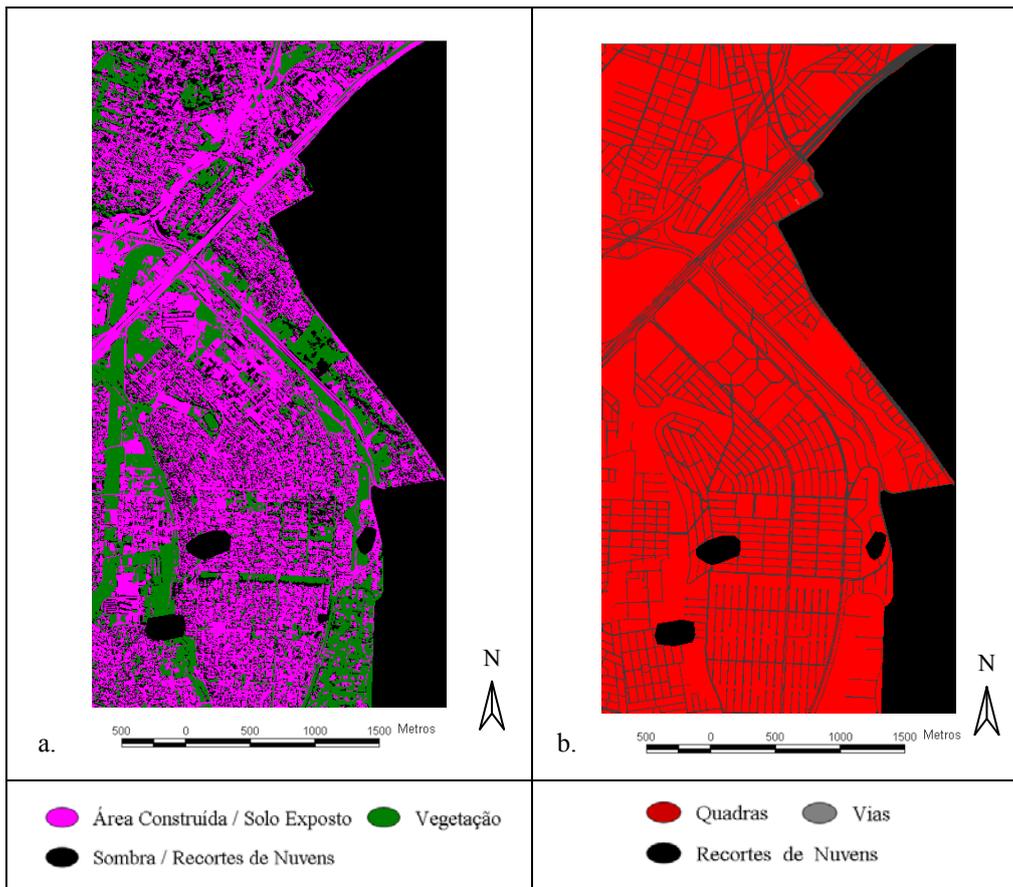


Fig. 3 – a. Classificação do Nível 2. b. Classificação do Nível 3. Fonte: PINHO (2005).

O passo seguinte consistiu na definição das classes de áreas residenciais homogêneas. Nove classes foram estabelecidas de acordo com as características da área de estudo:

- (i) residências multifamiliares do tipo I (edifícios isolados), com padrão médio ou alto;
- (ii) residências multifamiliares do tipo II (conjuntos de edifícios), com padrão médio ou alto;
- (iii) área residencial unifamiliar de alto padrão do tipo I (terrenos grandes e alto percentual de áreas verdes);
- (iv) área residencial unifamiliar de alto padrão do tipo II (terrenos muito grandes e alto percentual de áreas verdes);
- (v) área residencial unifamiliar de médio padrão do tipo I (predominância de coberturas cerâmicas e relativa presença de áreas verdes);
- (vi) área residencial unifamiliar de médio padrão do tipo II (predominância de coberturas de cimento amianto e relativa presença de áreas verdes);
- (vii) área residencial unifamiliar de baixo padrão do tipo I (predominância de coberturas cerâmicas e escassa presença de áreas verdes, sobretudo nas vias);
- (viii) área residencial unifamiliar de baixo padrão do tipo II (predominância de coberturas de cimento amianto e escassa presença de áreas verdes, sobretudo nas vias);

- (ix) favelas (mistura de coberturas de cimento amianto e metálica).

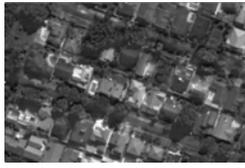
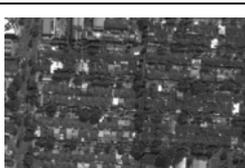
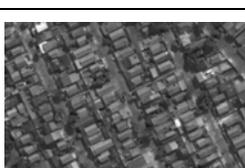
A classificação final das áreas residenciais homogêneas foi conduzida no Nível 4, e executada considerando vários atributos (tabela 1) por meio de um operador *fuzzy AND*, isto é, para cada classe, todos os atributos têm de ser atendidos. As chaves de interpretação para cada uma das classes basearam-se em critérios adotados em trabalhos anteriores para a área (SOUZA, 2003; GONÇALVES et al., 2006).

Curvas de pertinência *fuzzy* foram criadas para cada um dos atributos acima, considerando o comportamento dos mesmos em relação às referidas classes. Da mesma forma que nos demais níveis, algumas curvas são contínuas, e outras, rígidas (*crisp*). A figura 4 apresenta alguns exemplos dessas curvas no caso do atributo “Área Relativa de Cobertura Cerâmica Escura” para as classes unifamiliares de “Médio Padrão dos Tipos I e II”.

4.3 Criação de um indicador customizado de densidade de arborização viária

A maior parte das classes de áreas residenciais homogêneas pôde ser identificada pelos atributos de percentuais de área de tipos de cobertura e áreas vegetadas. No entanto, tornou-se evidente a dificuldade de discriminação entre as classes residenciais

TABELA 1 - ATRIBUTOS SELECIONADOS PARA DISCRIMINAR AS CLASSES DE ÁREAS RESIDENCIAIS HOMOGÊNEAS NO NÍVEL 4.

Áreas Residenciais Homogêneas	Amostras de Áreas Residenciais Homogêneas	Chaves de Interpretação	Atributos para a Discriminação das Classes
<i>Residencial Multifamiliar do Tipo I (MF I)</i>		Edifícios residenciais isolados, circundados por outros edifícios ou casas, contendo, na sua maioria, áreas de lazer e esportes privativas.	Existência de Objetos de Alto Brilho Área Relativa de Objetos de Alto Brilho Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Área Relativa de Sombra Área Relativa de Vegetação Arbórea
<i>Residencial Multifamiliar do Tipo II (MF II)</i>		Condomínios com múltiplos edifícios residenciais idênticos, contendo áreas de lazer e esportes privativas.	Existência de Objetos de Alto Brilho Área Relativa de Objetos de Alto Brilho Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Área Relativa de Sombra Área Relativa de Vegetação Arbórea
<i>Residencial Unifamiliar de Alto Padrão do Tipo I (AP I)</i>		Terrenos amplos. Árvores de grande porte dentro dos lotes e nas vias. Predomínio de coberturas de telha cerâmica.	Área Total Área Relativa de Vegetação Arbórea Área Relativa de Cerâmica Escura
<i>Residencial Unifamiliar de Alto Padrão do Tipo II (AP II)</i>		Terrenos extremamente amplos, com extensas áreas verdes. Predomínio de coberturas de telha cerâmica.	Área Total Área Relativa de Vegetação Arbórea Área Relativa de Cerâmica Escura
<i>Residencial Unifamiliar de Médio Padrão do Tipo I (MP I)</i>		Terrenos de médio-porte padrão. Árvores de médio e grande porte nas vias. Predomínio de coberturas de telha cerâmica.	Área Relativa de Cerâmica Escura Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Indicator de Densidade de Arborização Viária (IDAV acima do limiar)
<i>Residencial Unifamiliar de Médio Padrão do Tipo II (MP II)</i>		Terrenos de médio-porte padrão. Árvores de médio e grande porte nas vias. Predomínio de coberturas de amianto.	Área Relativa de Cerâmica Escura Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Indicator de Densidade de Arborização Viária (IDAV acima do limiar)
<i>Residencial Unifamiliar de Baixo Padrão do Tipo I (BP I)</i>		Existência freqüente de meio-lote e de unidades domiciliares menores. Poucas árvores nas vias. Predomínio de coberturas de telha cerâmica.	Área Relativa de Cerâmica Escura Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Indicator de Densidade de Arborização Viária (IDAV abaixo do limiar)
<i>Residencial Unifamiliar de Baixo Padrão do Tipo II (BP II)</i>		Existência freqüente de meio-lote e de unidades domiciliares menores. Arborização viária rara ou ausente. Mescla de telha cerâmica e amianto.	Área Relativa de Cerâmica Escura Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Indicator de Densidade de Arborização Viária (IDAV abaixo do limiar)
<i>Favelas (FAV)</i>		Sistema viário e lotes não definidos. Mescla de coberturas de amianto, metálica e cerâmica, com predominância de amianto.	Não Existência de Piscinas Área Relativa de Objetos de Alto Brilho Área Relativa de Concreto/Amianto Escuro Área Relativa de Cobertura Metálica Área Relativa de Sombra Área Relativa de Vegetação Rasteira

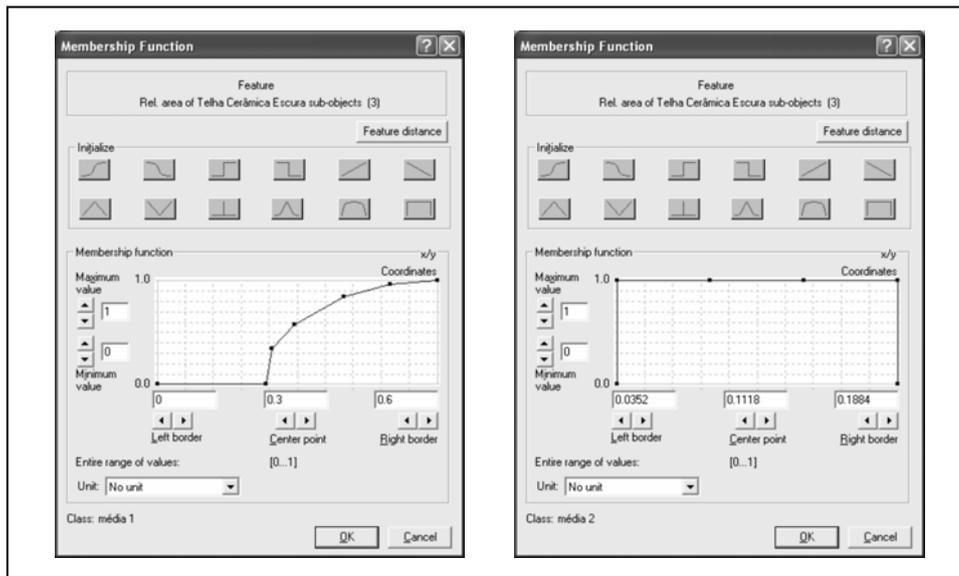


Fig. 4 – Curvas de pertinência *fuzzy* com relação ao atributo “Área Relativa de Cobertura Cerâmica Escura” para as classes unifamiliares de “Médio Padrão do Tipo I” (esquerda), de caráter contínuo, e do “Tipo II” (direita), *crisp*.

unifamiliares de médio e baixo padrão, uma vez que os percentuais de áreas verdes e tipos de cobertura sozinhos não foram capazes de distingui-las.

Uma característica peculiar que diferencia as áreas residenciais de padrão médio daquelas de baixo padrão é a diferença de densidade de arborização viária. Isto se explica em virtude do fato de que os bairros de baixo padrão surgem, na maioria das vezes, de forma irregular. Posteriormente, eles são regularizados, mas as iniciativas públicas de arborização viária não são tão efetivas se comparadas com as correspondentes iniciativas nos casos dos bairros de médio padrão, cujas vias são usualmente bem arborizadas.

Para se estimar a densidade de arborização viária, uma primeira alternativa consistiu no cálculo da área total da classe “Vegetação Arbórea” (Nível 1) situada sobre a classe “Vias” (Nível 3) dentro de um *buffer* de 15m em torno de cada quadra residencial (Nível 5). Uma segunda possibilidade constitui-se na estimativa do percentual do perímetro de intersecção entre a classe “Vegetação Arbórea” (Nível 1) e a classe “Quadra Residencial” (Nível 5), considerando, da mesma forma que na alternativa anterior, apenas os objetos ou polígonos da classe “Vegetação Arbórea” situados sobre a classe “Vias” (Nível 3), em relação ao perímetro total da quadra residencial. Ambas as soluções foram combinadas em uma única, implementada no ambiente TerraView – de caráter modular, extensível e de código aberto (<http://www.dpi.inpe.br/terraview.html>) – em vista de restrições operacionais do Definiens.

Um limiar foi estabelecido para o atributo assim criado, denominado “Indicador de Densidade de Arborização Viária” (IDAV), e destinado a diferenciar áreas residenciais de médio e de baixo padrão (equação 1). Esse indicador espacializado foi posteriormente importado no banco de dados do Definiens no Nível 6, indicando as quadras residenciais que se encontravam

abaixo do limiar, de acordo com a seguinte expressão booleana:

$$IDAV = AA \leq 100 \text{ m}^2 \text{ and } PI/PTQ \leq 0,06, \quad (1)$$

em que *AA* refere-se à área total da classe “Vegetação Arbórea” situada sobre a classe “Vias” dentro de um *buffer* de 15m em torno de cada quadra residencial, *PI* corresponde ao perímetro de intersecção entre a classe “Vegetação Arbórea” e a classe “Quadra Residencial”, considerando apenas os objetos ou polígonos da classe “Vegetação Arbórea” situados sobre a classe “Vias”, e *PTQ* diz respeito ao perímetro total da quadra residencial. Quando ambos os critérios forem atendidos, isto é, *AA* for igual ou inferior a 100m² e *PI/PTQ* igual ou inferior a 0,06, então a quadra residencial eleva o seu grau de pertinência *fuzzy* para a classe de baixo padrão, visto que a mesma apresenta escassez de arborização viária.

4.4 Estrutura hierárquica para a classificação de áreas residenciais homogêneas

O processo de extração de áreas residenciais homogêneas foi estruturado com base em um processo de classificação baseada em conhecimento (ou cognitiva) de duplo estágio, sumarizado na figura 5.

Conforme exposto na Seção 4.1, a partir de uma imagem QuickBird e do *layer* contendo o sistema viário, no Nível 3, conduziu-se uma classificação preliminar de vegetação, sombra e áreas construídas/solo exposto no Nível 2. Observando-se esses dois níveis, procedeu-se à classificação de cobertura do solo no Nível 1.

Em uma segunda etapa, as quadras foram manualmente classificadas em residenciais e não residenciais no Nível 5. Em seguida, um indicador customizado de densidade de arborização viária foi

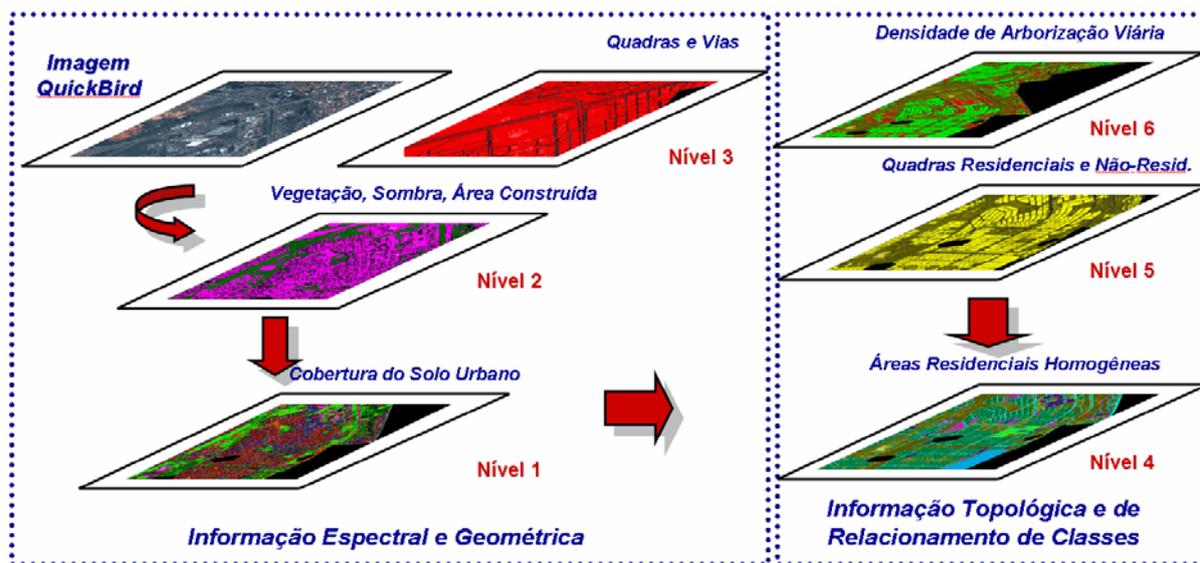


Fig. 5 – Fluxograma esquemático do processo de classificação cognitiva das áreas residenciais homogêneas.

limiarizado de forma binária e espacializado no Nível 6. Considerando-se simultaneamente os Níveis 1, 5 e 6, foi possível, por fim, executar a classificação de áreas residenciais homogêneas no Nível 4.

Assim, os Níveis de 1 a 3 referem-se ao primeiro estágio do processo de classificação, considerando principalmente a informação de ordem espectral e geométrica. Os Níveis de 4 a 6, por outro lado, dizem respeito ao segundo estágio desse processo, que se baseou sobretudo em informação topológica e de relacionamento entre as classes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classificação final do Nível 4 é apresentada na figura 6, e dos Níveis 5 e 6, na figura 7. Observa-se que apenas um polígono não foi classificado (NC) no Nível 4, o qual corresponde a uma área residencial “Unifamiliar de Alto Padrão” em construção, e que excepcionalmente apresenta altos percentuais de Solo Exposto e baixos de Cobertura Cerâmica Escura.

As áreas residenciais “Multifamiliares” foram bem identificadas, com atributos idênticos para os Tipos I e II, diferenciando-se apenas nas curvas e valores de pertinência *fuzzy*. As áreas “Unifamiliares de Alto Padrão” foram bem discriminadas, com base nos atributos de Área Total, Área Relativa de Vegetação Arbórea e de Cobertura Cerâmica Escura.

A área de “Médio Padrão do Tipo I” é a classe residencial mais comum na cidade, com um percentual máximo de 25% de “Cobertura de Cimento Amianto Escuro”, e mínimo de 30% de “Cobertura Cerâmica Escura”. Por outro lado, a área de “Médio Padrão do Tipo II” refere-se a um bairro bem característico na cidade, que apresenta de 40% a 50% de “Cobertura de Cimento Amianto” e até 18% de “Cobertura Cerâmica”.

Embora as “Favelas” apresentem o mais complexo conjunto de atributos, elas foram bem

identificadas. A maior confusão permaneceu na discriminação entre as áreas residenciais de “Médio e as de Baixo Padrão”, de ambos os tipos (I e II).

A classificação final de áreas residenciais homogêneas no Nível 4 foi submetida a uma validação por meio da inserção de um layer de verdade terrestre no Nível 7, construído com base em observações de campo e considerando apenas os objetos pertencentes à classe “Quadra Residencial”. A matriz de confusão é apresentada a seguir (tabela 2), e o valor resultante do índice *Kappa* baseado em objetos foi de 78%. COHEN (1960) define *Kappa* como um coeficiente de concordância para escalas nominais, o qual exclui de sua análise a concordância atribuída à casualidade. O índice ou coeficiente *Kappa* considera todos os elementos da matriz de confusão, incluindo, além da diagonal principal, o somatório do produto entre os subtotais de linhas e colunas. A fórmula do índice *Kappa* é dada por:

$$K = (P_o - P_e) / (1 - P_e), \quad (2)$$

em que P_o , denominado de concordância total ou exatidão global, é dado pela razão do somatório da diagonal principal ($\sum X_{ii}$) pelo número total de observações (N), e P_e é expresso pelo somatório do produto dos elementos marginais (subtotais) das linhas e colunas ($\sum X_{i+} \cdot X_{+i}$) pelo número total de observações ao quadrado (N^2). P_e traduz a proporção de elementos atribuídos a determinada classe por puro acaso (COHEN, 1960).

De acordo com LANDIS e KOCH (1977), um índice *Kappa* de 78% pode ser considerado como “muito bom”, uma vez que a qualidade da classificação pode ser definida em função dos seguintes intervalos de índice *Kappa*: [$<0,00$]: muito ruim; [$0,00 - < 0,20$]: ruim; [$0,20 - < 0,40$]: aceitável; [$0,40 - < 0,60$]: bom; [$0,60 - < 0,80$]: muito bom; [$0,80 - 1,00$]: excelente.

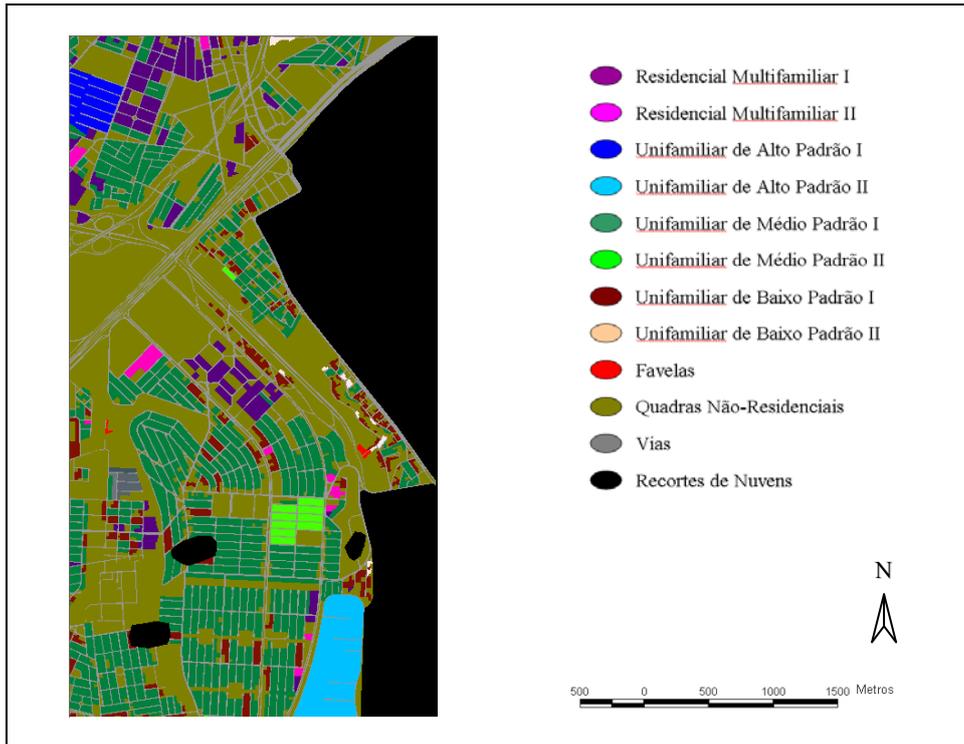


Fig. 6 – Classificação do Nível 4 (áreas residenciais homogêneas).

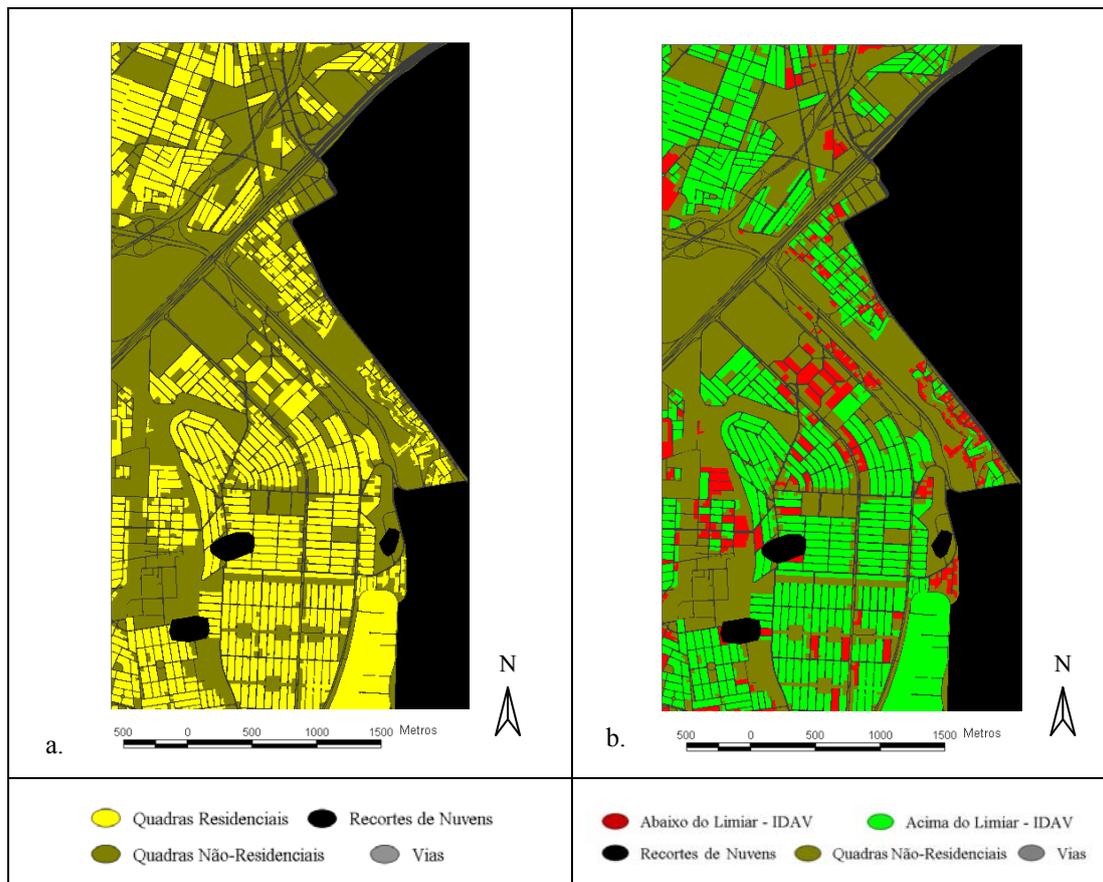


Fig. 7 – a. Classificação do Nível 5 (quadras residenciais e não-residenciais). b. Classificação do Nível 6 (indicador de densidade de arborização viária, mostrando quadras acima e abaixo do limiar).

TABELA 2 – MATRIZ DE CONFUSÃO PARA CÁLCULO DO ÍNDICE *KAPPA* BASEADO EM OBJETOS.

Verdade Terrestre		MF I	MF II	AP I	AP II	MP I	MP II	BP I	BP II	FAV	NC	Total
Classificação	MF I	66										66
	MF II		10									10
	AP I			1								1
	AP II				1							1
	MP I					376		16	1			393
	MP II					1	9		1			11
	BP I					48		65				113
	BP II								6			6
	FAV									3		3
	NC										1	1
Total		66	10	1	1	425	9	81	8	3	1	605

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma metodologia semi-automatizada para o mapeamento de áreas residenciais homogêneas em uma porção do setor sul da cidade de São José dos Campos, SP, baseada em um modelo cognitivo desenvolvido na plataforma Definiens, o qual incluiu segmentação multiresolução e classificação orientada a objeto de imagem QuickBird.

A metodologia mostrou-se adequada para esse fim, uma vez que o modelo possui um nível elevado de detalhamento, compreendendo um total de nove classes de uso do solo residencial, apresentando um índice *Kappa* de 78%, o que expressa uma concordância muito boa entre a classificação e os dados de referência.

A realização desse procedimento não teria sido possível nas plataformas convencionais de processamento digital de imagens, as quais operam, na sua grande maioria, apenas com informações estatísticas dos segmentos (média, variância e, eventualmente, métricas texturais) e exclusivamente com um único nível de segmentação. Os modernos sistemas de interpretação baseados em conhecimento representam, portanto, uma ruptura de paradigmas em relação a procedimentos clássicos de classificação de imagens digitais, na medida em que (i) operam com vários níveis de segmentação interrelacionados entre si; (ii) admitem como dados de entrada não somente imagens, mas também dados quantitativos *raster* e dados vetoriais; (iii) além de considerarem atributos espectrais, geométricos e topológicos dos objetos em cada nível de segmentação, bem como as características contextuais e de relacionamento semântico entre seus correspondentes super e sub-objetos nos distintos níveis hierárquicos.

Como metas futuras, os autores planejam investigar medidas de textura relacionadas a classes específicas de áreas residenciais homogêneas, explorar outros atributos customizados (aritméticos e/ou relacionais), operar com dados cadastrais, assim como incluir modelos tridimensionais (LIDAR ou ópticos), de forma a permitir a discriminação precisa entre classes de

uso do solo residencial semelhantes, tais como condomínios de residências unifamiliares assobradadas (com ou sem sótãos) e edifícios multifamiliares com cobertura de telha cerâmica e poucos pavimentos, quando estes estiverem presentes na cena em análise.

O mapeamento de áreas residenciais homogêneas possibilita um grande número de aplicações em planejamento e gestão urbana, pois fornece informações valiosas sobre o espaço intra-urbano, além de subsidiar estudos de climatologia urbana, inferência populacional, implementação de equipamentos sociais e políticas públicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar a sua gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e à Agência Espacial Alemã (DLR), que financiaram o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, através do Processo n.º. 05/06-491084.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T. ed. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag, 2000. p. 12-23.

BAUER T., STEINNOCHER K. Per parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique. *Proceedings of the GeoBIT/GIS 6 2001*, p. 24-27, 2001.

CENTENO, J. A. S.; ANTUNES, A. F. B.; TREVIZAN, S.; CORREA, F. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 55/01, p. 48-56, Jul. 2003.

- COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37-46, 1960.
- DONNAY, J. P.; BARNESLEY, M. J.; LONGLEY, P. A. Remote Sensing and Urban Analysis. In: DONNAY, J. P.; BARNESLEY, M. J.; LONGLEY, P. A. **Remote Sensing and Urban Analysis**. London: Taylor & Francis, 2001. 268p. GISDATA 9, Cap. 1, p. 3-18.
- DURIEUX, L.; LAGABRIELLE, E.; NELSON, A. A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of Spot 5 images and existing GIS data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 4, p. 399-408, Jul. 2008.
- GONÇALVES, C. D. A. B.; SOUZA, I. M.; PEREIRA, M. N.; FREITAS, C. C. Análise do ambiente residencial urbano visando à inferência de população utilizando dados de sensoriamento remoto orbital de alta resolução. **Revista Geografia**, v. 31, n. 2, p. 371-402, Mai.-Ago. 2006.
- HEROLD, M.; LIU, X. H.; CLARKE, K. C. Spatial metrics and image texture for mapping urban land use. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 991-1001, Sept. 2003.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, Mar. 1977.
- MOELLER, M.; BLASCHKE, T. Urban change extraction from high resolution satellite image. In: **Proceedings of the ISPRS Technical Commission II Symposium 2006**. Viena, Áustria: ISPRS, 2006, p. 151-156.
- PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos - SP**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2005.
- SCHACKELFORD, A.; DAVIS, H. C. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 10, p. 2354-2363, Oct. 2003.
- SOUZA, I. M. **Análise da estrutura do espaço intra-urbano para estimativa populacional intercensitária utilizando dados orbitais de alta resolução espacial. São José dos Campos**. Dissertação de Mestrado em Planejamento Urbano e Regional. Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, São José dos Campos, 2003.
- STOW, D.; LOPEZ, A.; LIPPITT, C.; HINTON, S.; WEEKS, J. Object-based classification of residential land use within Accra, Ghana based on QuickBird satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 22, p. 5167-5173, Nov. 2007.
- WU, S.; XU, B.; WANG, L. Urban land-use classification using variogram-based analysis with an aerial photograph. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 7, p. 813-822, Jul. 2006.
- ZENG, Y.; ZHANG, J.; WANG, G.; LIN, Z. Urban land-cover classification using integrated airborne laser scanning data and high resolution multi-spectral satellite imagery. **Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium 2002**. Denver, CO: ISPRS, 2002.
- ZHAN, Q.; MOLENAAR, M.; GORTE, B. Urban land-use classes with fuzzy membership and classification based on integration of remote sensing and GIS. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, Parte B7, p. 1751-1760, 2000.
- ZHAN, Q.; MOLENAAR, M.; TEMPFLI, K. Hierarchical image object-based structural analysis toward urban land use classification using high resolution imagery and airborne LIDAR data. **Proceedings of the Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, IEEE/ISPRS Joint Workshop 2001**, p. 251-258, 2001.