

ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO NO MAPEAMENTO DE ÁREAS URBANAS COM IMAGENS LANDSAT

Object oriented image analysis of urban areas with LANDSAT images

CLAUDIA DURAND ALVES
MADALENA NIERO PEREIRA
TERESA GALLOTTI FLORENZANO
ÍRIS DE MARCELHAS E SOUZA

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{durand, madalena, teresa, iris}@dsr.inpe.br

RESUMO

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a classificação automática de áreas urbanas contínuas e dispersas que caracterizam a urbanização dispersa, de regiões do Estado de São Paulo com altos índices de urbanização. Busca-se desenvolver uma metodologia que permita repetir o procedimento em outras regiões do país, com o aumento da exatidão do mapeamento, assim como com a redução do tempo e a subjetividade. Para este fim utilizou-se a classificação Orientada a Objeto em imagens LANDSAT do município de São José dos Campos, relativas a 1985 e 1999. Este procedimento consiste na segmentação multiresolução das imagens e na classificação baseada na lógica fuzzy. Considerando a resolução espacial das imagens utilizadas e o tipo de relevo da área de estudo, a classificação orientada a objeto teve um bom desempenho no mapeamento de áreas urbanas. Os resultados obtidos mostram que a metodologia desenvolvida pode ser replicada em outras áreas urbanas.

Palavras-chave: Análise orientada a objeto; Áreas urbanas; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Abstract: This study attempts to develop an automatic approach to classify continuous and disperses urban areas that characterize the urban sprawl, in high urbanization regions of São Paulo State. The objective is to achieve a methodology for the increase of precision and reduction of processing time, to be applied in other regions of Brazil. Object Oriented Image Analysis with Definiens software and

LANDSAT images of the São José dos Campos municipality of 1985 and 1999 were used. This procedure consist of multiresolution image segmentation and classification based on a logical fuzzy. Considering the resolution of the images used, and the relief of the study area the Object Oriented Image Analysis have a good performance to map urban areas. The results obtained show that the developed methodology can be replicate in other urban areas.

Keywords: Object oriented image analysis; Urban areas; Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

Embora as áreas urbanas ocupem uma porção relativamente pequena da superfície terrestre, sua extensão, distribuição e evolução têm grande impacto no meio ambiente e na dinâmica sócio-econômica mundial (SMALL, 2005). Na aquisição de informação sobre essas áreas, os dados e técnicas de sensoriamento remoto exercem um importante papel.

As cidades brasileiras apresentam rápido processo de expansão urbana dado às elevadas taxas de crescimento natural da população e migração rural-urbana, quando comparadas com países com alto desenvolvimento tecnológico. De acordo com Maktav (2005), o crescimento não controlado da população e a urbanização rápida especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil têm grande impacto no meio ambiente. Considerando que muitas atividades de uso da terra podem resultar em mudanças irreversíveis, é necessário que as necessidades das futuras gerações sejam consideradas.

Até a década de 70 o crescimento urbano no Brasil se dava pela expansão contínua da mancha urbana do centro para a periferia, direcionada muitas vezes pelas condições dos sítios urbanos. A partir de então tem início o processo de urbanização dispersa caracterizado pelo surgimento de pequenos núcleos isolados formados por usos industriais, condomínios residenciais fechados, universidades, etc, tendo como acesso as rodovias. Em relação aos condomínios fechados, que ocupam grandes extensões de terra, a população é atraída pela busca de melhor qualidade de vida e segurança. Estes grandes espaços privados poderão trazer problemas futuros como os relacionados com a circulação de pessoas e mercadorias.

Dada à importância e porte das modificações na forma de crescimento das cidades brasileiras estão sendo desenvolvidos estudos como, por exemplo, o de Reis (2006) que apresentam um diagnóstico das áreas urbanizadas. Segundo este autor, essas mudanças ocorrem com: a formação de áreas de urbanização dispersa, que se estendem por vasto território e separadas no espaço físico, mas mantendo estreitos vínculos entre si, como elemento de um único sistema; a regionalização do cotidiano das pessoas que adotam novos modos de vida, em função da mobilidade; novas formas de gestão do espaço pelo surgimento de usos condominiais diversificadas como condomínios residenciais, grandes shoppings centers, complexos universitários, entre outras.

Alguns estudiosos da urbanização dispersa, entre eles Hasse e Lathrop (2003), vem desenvolvendo medidas espaciais para melhor identificar e quantificar as características desse processo. Os problemas da urbanização dispersa destacados por esses estudiosos são: a dependência do carro; perda de terras agrícolas; impactos ambientais com a derrubada da vegetação natural e conseqüentemente perda da diversidade; fragmentação e desconexão de ecossistemas; alteração no sistema de drenagem pela destruição de matas galerias e poluição dos córregos. Como este tipo de urbanização está ligado à auto-estrada, verifica-se um congestionamento das rodovias devido ao saturamento das vias de acesso. Outro aspecto, diz respeito à infra-estrutura: vias de acesso, distribuição de água, coleta de lixo, transporte público, energia elétrica, cujos custos são encarecidos em um ambiente urbano fragmentado.

O desenvolvimento desse modelo de urbanização necessita da intervenção de órgãos governamentais, responsáveis pelo uso do solo por meio de novas políticas públicas, para que tenha sustentabilidade e não sejam repetidos os problemas encontrados em outras regiões. De acordo com Carmo and Hogan (2006), as fragilidades ecossistêmicas exigem que no planejamento e na implementação de políticas públicas, a questão da sustentabilidade seja priorizada desde o início.

Medidas deverão ser tomadas quanto ao planejamento do território para que o investidor particular não realize o empreendimento atendendo apenas a interesses imediatos de lucro. Segundo Bonduki (2005) as cidades têm condições de planejar seu futuro, reduzirem as desigualdades, promover um adequado uso do solo, evitando desastres ambientais. Neste sentido, o poder público deverá intensificar a fiscalização da aplicação das leis, para que não se transformem em meras formalidades que não saem do papel.

O estudo e monitoramento do crescimento das áreas urbanas tornam-se difíceis e onerosos se realizados com técnicas convencionais de obtenção de dados, como levantamento de campo e levantamentos aerofotogramétricos tradicionais embora este último tenha tentado ajustar-se para tornar-se competitivo. A partir do lançamento dos satélites da série Landsat, os estudos urbanos contaram com uma nova ferramenta para obtenção de dados que proporciona repetitividade, visão sinótica e cobertura de extensas áreas.

Em um primeiro momento o uso das imagens MSS Landsat 1, 2, e3 (resolução espacial de 80m) direcionou-se basicamente para estudos de crescimento da mancha urbana devido à limitação da resolução espacial e espectral dessas imagens. Devido a estas limitações, as áreas de solo exposto, preparadas para agricultura, ou áreas de mineração, localizadas na franja rural-urbana eram classificadas em sua maioria como urbana aumentando os erros de inclusão nos mapeamentos.

Com o avanço tecnológico no desenvolvimento de novos sensores como, por exemplo, TM-Landsat, resultando na melhoria da resolução espacial, radiométrica e espectral dos dados surgem novas possibilidades de uso de imagens orbitais para estudo urbano. Ocorre também um avanço na melhoria da precisão das informações

geradas. A melhoria na resolução espacial é importante para o estudo das áreas urbanizadas e do uso do solo urbano, pois além da sua complexidade os alvos urbanos têm pequena dimensão.

As informações retiradas das imagens, a um baixo custo e em curto espaço de tempo, poderão ser integradas, utilizando um Sistema de Informações Geográficas, com informações obtidas por meio dos censos demográficos, de pesquisas Institucionais e outros dados levantados por prefeituras e demais órgãos. Todas as informações geradas podem, além de subsidiar o planejamento racional do uso de solo, servir para acompanhar a implantação das medidas estabelecidas pelos Planos Diretores.

Concomitante ao avanço dos sensores ocorre àquele referente ao desenvolvimento de novas técnicas de interpretação automática e análise dos dados que permite gerar uma grande quantidade de informação de forma sistemática e objetiva. Um exemplo desse avanço são as abordagens orientadas a objetos que segundo Maktav (2005) mostram-se eficientes em muitas aplicações. A classificação por meio da análise orientada ao objeto baseia-se no agrupamento de pixels a partir da segmentação da imagem. Neste método de classificação, a segmentação é o passo preliminar que divide a imagem em objetos homogêneos e contíguos. Segundo Yan et al (2006), a acurácia da segmentação afeta diretamente o desempenho da classificação.

Neste sistema os objetos se relacionam por meio da definição da rede hierárquica (herança dos atributos que descrevem a classe) e da rede semântica (estrutura lógica de relação entre as classes). Para a classificação é utilizado o maior grau de pertinência dos objetos à determinada classe por meio da lógica fuzzy (Pinheiro, 2005).

Uma das vantagens da análise orientada a objeto, segundo Chubey et al. (2006), é a multiplicidade de informações adicionais que podem ser derivadas de uma imagem-objeto em relação àquelas disponíveis em pixels individuais. Somando-se à informação baseada nas características espectrais tem-se a informação baseada no tamanho do objeto, forma e contexto que podem ser calculadas como pertencente a um subobjeto ou superobjeto numa hierarquia multiníveis.

Bruzzone (2006) em trabalho desenvolvido para a criação de um sistema de classificação baseado em contexto multiníveis para imagens de alta resolução espacial destaca que a classificação orientada a objeto e/ou estratégias multiníveis/multiescala é baseada no sistema de comportamento humano na interpretação visual de dados. A racionalidade desta abordagem é a de que cada imagem é composta de objetos de diferentes tamanhos e formas interrelacionados. Assim, cada objeto pode ser modelado pela forma e por medidas topológicas que podem ser usadas e integradas com características espectrais para melhorar a precisão da classificação.

Tullis e Jensen (2003) desenvolveram e testaram um método automático para extrair unidades residenciais de dados multiespectrais de satélite. Foram utilizadas imagens multiespectrais e NDVI do IKONOS além das variáveis: forma, tamanho, e contexto para detecção de unidades residenciais. Eles concluíram, pelos resultados obtidos, que a detecção automática de unidades residenciais usando imagens de satélite poderá se tornar uma ferramenta importante em futuro próximo.

Yan et al. (2006) testaram o desempenho da classificação baseada em pixel (Máxima Verossimilhança) e da orientada a objeto para o mapeamento de classes de uso e cobertura do solo visando à definição de áreas potenciais de queima de carvão em território chinês. O mapa temático resultante da análise orientada a objeto apresentou uma exatidão total de 83,25%, maior que aquela obtida pela classificação pixel a pixel, de 46,48%. As áreas construídas/edificadas foram discriminadas somente com a classificação orientada a objeto.

Segundo Mitri e Gitas (2004) a classificação orientada a objeto tem sido desenvolvida para superar as limitações dos métodos tradicionais de extração de informação quando se usa imagem de alta resolução espacial. Eles desenvolveram pesquisa para avaliar o desempenho da classificação orientada a objeto no mapeamento de áreas queimadas na ilha grega de Thasos usando dados TM-LANDSAT corrigidos topograficamente e não corrigidos. O mapa das áreas de queimadas apresentou uma exatidão global de 97,69% usando imagens não corrigidas topograficamente e um acréscimo de 1,16% na classificação usando as imagens corrigidas.

No Brasil, um dos estudos pioneiros com classificação orientada a objeto aplicada a imagens de alta resolução espacial foi o de Antunes (2003). O estudo visou o mapeamento de tipologias vegetais em ambiente ciliar do rio Paracatu, município de Nova Esperança (PR) a partir do uso de imagens Ikonos. O autor comparou os resultados obtidos por métodos tradicionais de classificação automática baseados em pixels como máxima verossimilhança e lógica fuzzy e a classificação orientada a objeto e verificou a superioridade desta. Salientou a importância da inserção do conhecimento no processo de classificação que possibilita incrementar a precisão dos resultados e coloca que a metodologia apresentada foi eficiente para a classificação da mata ciliar e outros usos circunvizinhos como área urbana e agricultura. Nessa linha de estudo destacam-se os trabalhos de Pinho (2005), Araújo (2006) e Rocha (2007), Antunes e Cortese (2007).

Pinho (2005) utilizou análise orientada a objetos na classificação de cobertura do solo intra-urbano com dois tipos de imagens orbitais de alta resolução espacial (IKONOS II e QuickBird). A área teste localiza-se no município de São José dos Campos-SP. Os resultados das classificações mostraram que este tipo de abordagem apresenta um bom potencial na classificação de cobertura do solo urbano a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. Apesar da diferença de resolução espacial das imagens (1m do QuickBird e 4 m do IKONOS), ambas

forneceram boa exatidão temática (Kappa em torno de 0,50), com uma diferença não significativa entre os dois resultados.

Araújo (2006) realizou o mapeamento multitemporal do solo urbano de dois bairros de Belo Horizonte – MG, utilizando imagens QuickBird de 2002 e 2004 e classificação orientada a objetos. Com os resultados dessa classificação (Kappa acima de 0,70) e dados geológicos, geotécnicos e legais, o autor fez inferências espaciais. Uma ortoretificação foi realizada em ambas as imagens, adotando-se o modelo rigoroso, o que permitiu uma boa sobreposição dos dados no SIG. Desse modo, foram geradas informações sobre a expansão urbana desses bairros entre 2002 e 2004, ocupações irregulares, bem como de áreas com risco de deslizamento de encostas.

Rocha (2007) desenvolveu uma metodologia de classificação de imagens de alta resolução espacial QuickBird, usando o software eCognition, para identificar e avaliar o crescimento de áreas de ocupação irregular. A área teste do estudo localiza-se no município de Piraquara-PR, da Região Metropolitana de Curitiba. A partir da metodologia desenvolvida obteve um mapa temático das áreas ocupadas e não ocupadas e nestas últimas o estágio do sistema viário e adensamento das edificações. A diferença entre o adensamento das edificações obtido da classificação automática e o da interpretação manual foi inferior a 10%. Esse resultado evidencia a potencialidade do uso da metodologia para mapeamento de áreas urbanizadas. O autor constatou a importância da utilização de informações de textura, forma, contexto, relações de hierarquia e vizinhança em complemento às informações espectrais das imagens originais na obtenção desse resultado.

Antunes e Cortese (2007) desenvolveram estudo cujo objetivo foi avaliar a discriminação de ocupações irregulares ou aglomerados subnormais por meio do uso de imagem QuickBird segmentada em diferentes níveis hierárquicos usando o software eCognition tendo como área teste região localizada no município de Paranaguá-PR. A metodologia permitiu a detecção de áreas de ocupação irregular em manguezais. Foi verificado que 95% das ocupações urbanas na região estão irregulares.

Conforme Lee and Lathrop (2006), que desenvolvem sistemas de classificação automática visando o mapeamento de coberturas urbanas (e suburbanas), o aumento de pesquisas nesta linha decorre da preocupação com a urbanização dispersa de áreas metropolitanas não só dos EUA, mas do globo. Os autores salientam que o problema do uso de imagens de média resolução espacial para estes mapeamentos é a grande quantidade de pixels mistos, resultantes da mistura de respostas espectrais de vários alvos: superfícies impermeáveis, gramas e árvores. Os sistemas tradicionais de classificação de associar um pixel a um único uso do solo ou cobertura tornam-se inviáveis em áreas urbanas espacialmente heterogêneas com alta proporção de pixels mistos. Desse modo, visando contornar esse problema, nos estudos urbanos vem sendo utilizadas ou imagens de média resolução espacial com métodos de análise de subpixels, ou imagens de alta resolução espacial (menor que

5 metros) com técnicas sofisticadas de segmentação e classificação (por ex., orientada a objeto). Segundo estes autores ao uso de imagens de alta resolução espacial, entretanto, está associado alto custo em termos de aquisição dos dados, processamento e análise das informações.

Estudos destacados anteriormente, neste artigo, confirmam a grande potencialidade da classificação orientada a objeto para mapeamento urbano, utilizando imagens de alta resolução espacial. Neste estudo, o objetivo foi avaliar o potencial desse método de classificação para mapeamento urbano com imagens de média resolução espacial. Considerando a disponibilidade de um banco de imagens Landsat de média resolução espacial (30m) e a extensão territorial das áreas urbanas brasileiras, o objetivo foi desenvolver uma metodologia de classificação automática de manchas urbanas contínuas e dispersas explorando essas imagens. Para isso, utilizou-se a classificação orientada a objeto em imagens Landsat de 1985 e 1999, do município de São José dos Campos, SP.

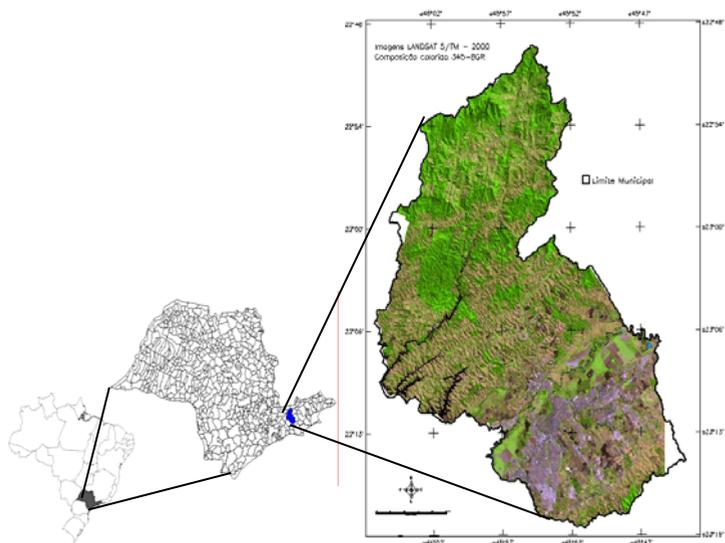
Nesse sentido, com este estudo pretendeu-se diminuir a subjetividade associada à interpretação manual de dados de sensoriamento remoto, acelerar o processo de obtenção de informações atualizadas e aumentar significativamente sua quantidade. Deste modo, visa-se subsidiar a análise do novo processo de urbanização (urbanização dispersa) que se caracteriza pela ocorrência de pequenos núcleos afastados do tecido urbano contínuo e contribuir com as políticas públicas.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de São José dos Campos está situado à leste do estado de São Paulo, no Médio Vale do Paraíba (FIGURA 1). Economicamente é o mais importante dos 35 municípios que compõem a Bacia do rio Paraíba do Sul. Ele sofreu expressiva taxa de crescimento demográfico a partir dos anos 50, resultando na implantação de um parque industrial diversificado, devido entre outros fatores à instalação do Centro Técnico Aeroespacial, incentivos fiscais oferecidos as indústrias e sua localização entre duas principais regiões metropolitanas, São Paulo e Rio de Janeiro.

O território do município de São José dos Campos abrange uma área de 1.118 km², sendo que 70% desta área, situada no centro-norte do município, são constituídas por morros, serras e montanhas. Os 30%, situados no sul, apresentam relevo formado por um extenso planalto, composto por uma série de platôs entrecortados por pequenos vales, onde se concentra quase toda a população urbana do município, em aproximadamente 120 km².

Figura 1–Área de Estudo



A área onde se localiza a malha urbana é a mais apta ao cultivo intensivo de culturas agrícolas. Este uso, no entanto, restringe-se somente à várzea do Paraíba do Sul e seu afluente (Rio Jaguari), além de pequenas glebas em torno do perímetro urbano. Nas várzeas predomina o cultivo de arroz, milho para a forragem, feijão da seca e, em menor escala, olericultura. Devido à topografia acidentada, os demais terrenos são inadequados ao cultivo intensivo do solo, fato que contribui para o desenvolvimento de pecuária leiteira extensiva nas pastagens naturais, atingindo cerca de 80% das propriedades produtivas.

3. MATERIAL

No desenvolvimento deste estudo foram utilizados os materiais relacionados a seguir.

Os dados de sensoriamento remoto utilizados neste estudo são: imagens das bandas 3, 4 e 5 dos sensores TM (Landsat 5) e ETM (Landsat 7), órbita/ponto 219/76, obtidas, respectivamente, em 12/03/1985 e 03/09/1999; mosaico aerofotogramétrico digital do ano 2000 (São José dos Campos, Prefeitura Municipal). Foi utilizado o Mapa de Uso da Terra do Município de São José dos

Campos (São José dos Campos, Prefeitura, 1985). Com relação aos aplicativos utilizaram-se o SPRING 4.3.3 e Definiens 5.0.

4. METODOLOGIA

Na realização deste estudo foram obedecidos os procedimentos descritos a seguir.

4.1 Cálculo do NDVI

Com o intuito de aumentar a discriminação das áreas urbanizadas das classes de vegetação nas imagens Landsat, gerou-se inicialmente uma imagem NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) no SPRING. Esse índice, realizado previamente à classificação e muito difundido, visa determinar a existência (ou não) de vegetação em diversos estágios de vigor e crescimento/densidade. A vegetação sadia (suprida de água e nutrientes) tem reflectância relativamente baixa na região do visível (a clorofila absorve a radiação solar para permitir a fotossíntese) e alta no infravermelho próximo (MOREIRA e SHIMABUKURO, 2004). Para obter o NDVI utilizou-se neste trabalho a razão da diferença dos valores digitais de cada pixel nas bandas 4 (infravermelho próximo) e 3 (visível) do TM e ETM, pela soma dos valores digitais dessas bandas, conforme definido pela Equação 1:

$$NDVI = (B4 - B3)/(B4 + B3) \quad (1)$$

na qual:

B4 são os valores digitais da banda 4

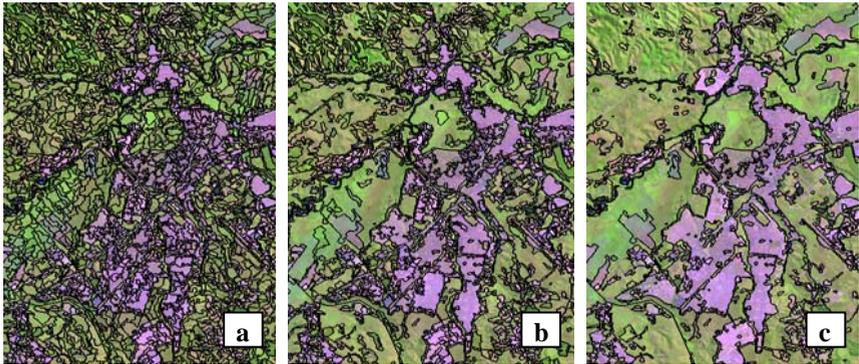
B3 são os valores digitais da banda 3

Os valores de NDVI são adimensionais e variam de -1 (vegetação com estresse hídrico) a +1 (vegetação sadia). No mapeamento dos núcleos urbanos aplicou-se a classificação orientada a objeto, utilizando o Software Definiens 5.0 (Definiens, 2006), nas imagens das bandas 3, 4 e 5, além da imagem NDVI gerada. A análise orientada a objeto disponível neste software se baseia em duas etapas: Segmentação Multiresolução e Classificação.

4.2 Segmentação

A segmentação Multiresolução foi realizada com base nos parâmetros de escala, cor, forma e textura, utilizando as imagens das bandas 3, 4 e 5 e a imagem NDVI. A partir de vários testes realizados optou-se pelo valor de escala 10, com peso maior para o parâmetro cor. Posteriormente, foi realizada uma segmentação denominada Diferença Espectral, na qual os objetos obtidos na segmentação anterior foram fundidos em função dos valores médios de intensidade que estes apresentavam em cada banda, considerando uma distância espectral 10 (valor definido empiricamente). Com base no resultado obtido repetiu-se o procedimento de segmentação por Diferença Espectral, com uma distância espectral de 20 níveis, visando a melhor separabilidade do objeto de interesse, a mancha urbana, como ilustra a (FIGURA 2).

Figura 2-Segmentação: Multiresolução (a), Diferença Espectral-10(b) e Diferença Espectral-20(c).

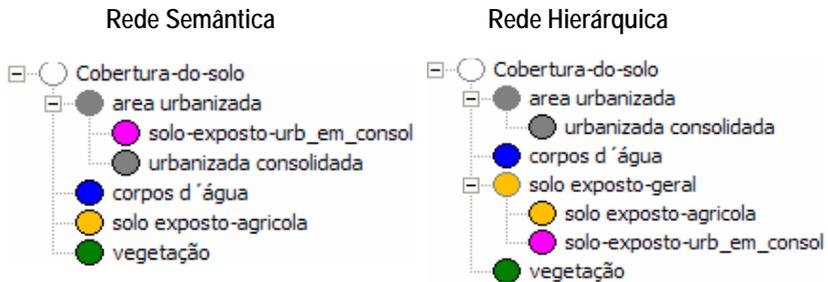


Esse tipo de segmentação permite seleccionar o layer que melhor discrimina uma determinada classe. Os objetos obtidos na segmentação podem se relacionar por uma relação semântica, hierárquica ou ambas.

4.3 Redes Semântica e Hierárquica

Para se estabelecer a relação entre as classes definidas para este estudo foram criadas duas redes, as redes semântica e hierárquica (FIGURA 3). Na definição dessas redes foram considerados os objetivos de interesse e as características espectrais e espaciais das imagens utilizadas. Desse modo, cada objeto foi classificado de acordo com seus atributos de relação semântica, hierárquica, ou ambas.

Figura 3-Redes Semântica (a) e Hierárquica (b).



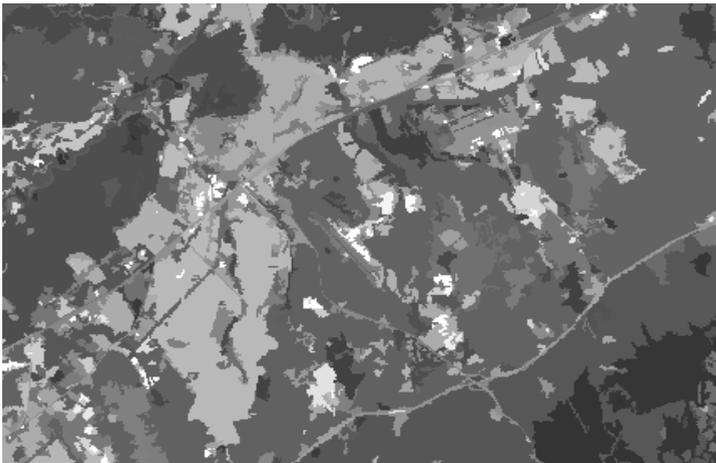
Na Figura 3 pode-se observar que a rede semântica mostra a relação entre as classes de interesse definidas no projeto, por exemplo, em áreas urbanizadas há vegetação rasteira e arbórea, corpos d'água e solo exposto. Atributos relacionais podem ser criados para a caracterização de uma determinada classe. A rede hierárquica define as heranças de atributos "físicos" entre as classes, tais como características espectrais, espaciais de forma, textura, etc.

4.4 Definição de Atributos

Nesta etapa determinaram-se os atributos que descrevem as classes de interesse. Foram utilizados aqueles atributos que apresentaram melhores resultados na discriminação das classes. Cada classe foi determinada por atributos de forma, cor, textura e contexto que, isoladamente ou em conjunto, melhor a caracterizam, permitindo obter um melhor resultado na classificação final. No software utilizado, Definiens 5.0, existem diversos atributos pré-definidos, podendo-se criar um número indefinido de atributos relacionais ou aritméticos a partir das características do objeto que o intérprete julgar relevantes.

Todos os atributos, disponíveis no Definiens, ou criados a partir da necessidade de classificação e características dos dados, foram espacializados para que fossem selecionados aqueles que melhor discriminam os objetos de uma determinada classe em relação a toda a área de estudo. A Figura 4 exemplifica a espacialização do atributo "nível de cinza" na banda 3 do ETM-LANDSAT. Com base nessa espacialização, e por meio da análise visual, foram selecionados os atributos que melhor caracterizam cada classe. Na imagem segmentada foram selecionados os polígonos amostrais referentes a cada classe analisada.

Figura 4-Espacialização da média de níveis de cinza na banda 3.

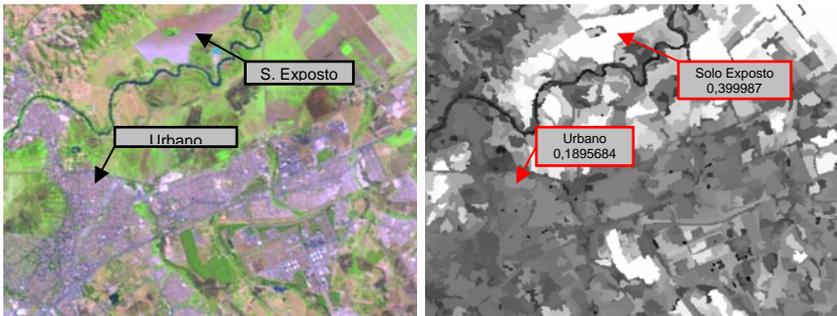


A partir das amostras foram gerados gráficos com os valores dos atributos de cada classe. Com isso, foram obtidas as funções de pertinência dos atributos descritores de cada classe. Esta análise auxilia tanto no processo de seleção dos próprios atributos e na definição do range de cada um deles, quanto no refinamento da seleção das amostras de cada classe.

Nesta etapa, os valores obtidos para as amostras das diferentes classes foram analisados por meio dos gráficos gerados, verificando-se a sua superposição, e do seu desvio padrão. Para a classe área urbanizada, de interesse deste trabalho, foram utilizados os atributos de nível de cinza (imagens da banda 3 e do NDVI), além da homogeneidade de textura em todas as direções (texturas através de Características de Haralick).

O atributo de textura foi utilizado para a separabilidade entre as classes área urbanizada e solo exposto, devido à confusão que ocorre entre estas duas classes. Entre os atributos de textura disponíveis foi selecionada a feição homogeneidade, já que as áreas urbanizadas apresentam-se com um padrão mais rugoso em relação às áreas com solo exposto como exemplifica a (FIGURA 5).

Figura 5-Atributo de textura (homogeneidade) espacializado: Textura de Área Urbanizada e Textura de Solo Exposto.



Nesta figura pode-se observar que os menores valores de homogeneidade aparecem em tons de cinza mais escuros, representando as áreas urbanizadas; enquanto os valores mais altos aparecem em tons mais claros e fazem referência às áreas de solo exposto.

4.5 Classificação

Como etapa final do processo de mapeamento das áreas urbanizadas foi feita a classificação, a partir dos atributos e seus intervalos de valores, definidos por meio

das amostras selecionadas. O mapeamento por meio do sistema de classificação orientada a objeto foi realizado para as imagens de 1985 e 1999.

Na imagem de 1999, além da segmentação multiresolução e classificação orientada a objeto foi aplicada uma segmentação simples (um nível) por regiões e uma classificação usando um único atributo e o classificador Bhattacharya. Em virtude da disponibilidade desta técnica no Spring (software livre) e da familiaridade dos autores com o sistema, optou-se pelo seu uso neste caso. Este tipo de classificação foi realizado visando avaliar e confirmar o ganho em exatidão da classificação orientada ao objeto da tradicional. A opção de classificação por regiões utiliza, além da informação espectral dos pixels contidos na imagem, a relação entre esses pixels e seus vizinhos. Na segmentação foram usados os índices de similaridade 10 (dez) e de área 50 (cinquenta), com base Pereira et al (2005), em seguida aplicou-se o classificador Bhattacharya. O classificador Battacharya permite a interação do usuário com o sistema, no processo de seleção de amostras de treinamento tendo como base as regiões (polígonos) resultantes da segmentação de imagens.

4.6 Avaliação da Classificação Orientada a Objeto

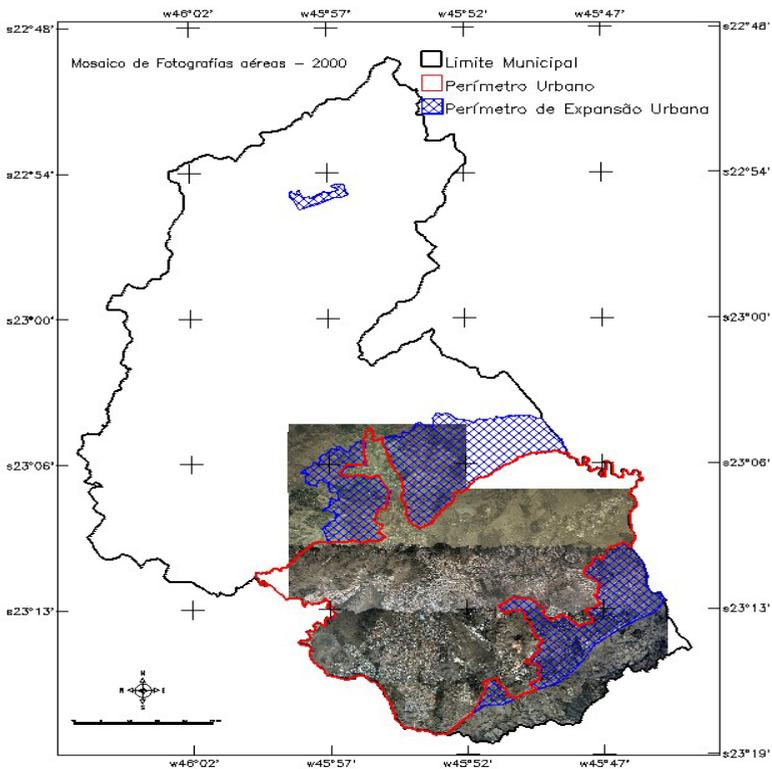
Na avaliação da exatidão da classificação, da imagem de 1985, utilizou-se como referência um mapa existente do município realizado por meio da interpretação manual de fotografias aéreas na escala 1:25.000 (São José dos Campos, Prefeitura Municipal, 1985). Para isso, as classes analisadas foram agrupadas em áreas urbanizadas e não urbanizadas.

Os resultados da classificação da imagem de 1999, utilizando os dois métodos foram avaliados utilizando-se como referência o mosaico aerofotogramétrico colorido digital, ortorretificado, do ano 2000 (São José dos Campos, Prefeitura Municipal) da área urbanizada de São José dos Campos. Neste caso não se dispunha de um mapeamento detalhado. A qualidade do mosaico aliada ao conhecimento da área de estudo facilitaram a interpretação das áreas urbanizadas, permitindo avaliar com alta confiabilidade os resultados obtidos. Esta área corresponde à maior parte do perímetro urbano e de expansão urbana, como é possível observar na Figura 6. Apesar da disponibilidade do mapeamento de 1985, para todo o município, a avaliação da imagem desta data foi feita considerando-se somente a área abrangida pelo mosaico digital de 2000, visando à comparação dos resultados da classificação obtidos para as duas datas.

No processo de avaliação dos dados utilizaram-se quadrículas amostrais de 1 km por 1 km superpostas ao mapeamento de 1985 e ao mosaico aerofotogramétrico. Optou-se por este sistema por ele permitir uma varredura completa da área mapeada, além de facilitar a visualização da distribuição espacial dos erros de classificação ocorridos. Os erros de omissão e inclusão foram identificados por meio da comparação visual dos resultados da classificação digital das imagens de 1985 e 1999 com o mapeamento existente e o mosaico, respectivamente. O critério

utilizado na avaliação das quadrículas em ambas as avaliações foi o de considerar o uso dominante, nas quadrículas em que houve classificadas corretamente, e o erro dominante, nas quais houve a ocorrência dos dois tipos de erros (omissão e inclusão), devido à dimensão espacial das quadrículas. O uso deste critério também se deu em função do método a ser utilizado na avaliação dos resultados obtidos basear-se na contagem das quadrículas, considerando-as como unidade de análise. Os índices utilizados na avaliação das classificações foram o Kappa e o de exatidão Global, obtido pela soma da diagonal da matriz de erros dividida pelo total de quadrículas amostrais analisadas.

Figura 6-Mosaico aerofotogramétrico digital da área urbanizada de São José dos Campos (ano 2000).



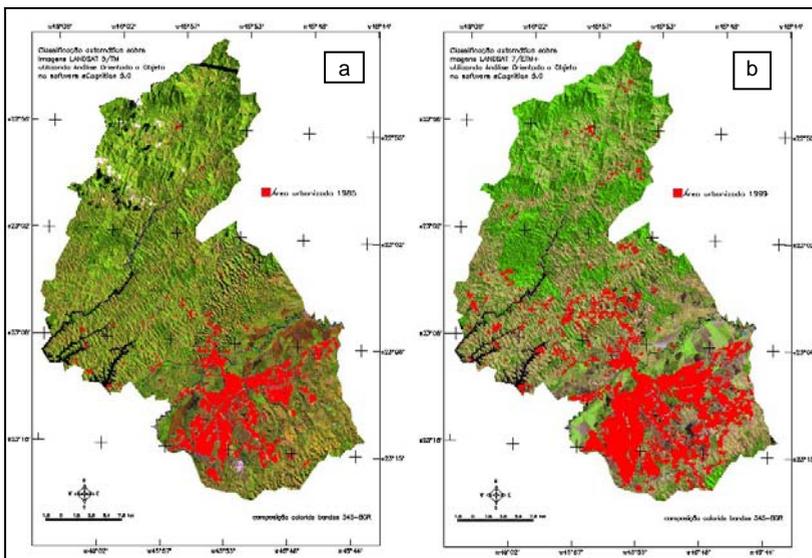
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No processo de classificação orientada a objeto verificou-se que na classe Áreas Urbanizadas foram incluídas áreas de Solo Exposto nas áreas de relevo

montanhoso. Para estas áreas, o uso do atributo textura pode reduzir, mas não eliminar totalmente a confusão entre essas classes. Ocorreram também situações em que áreas de solo exposto referentes à transição de uso como loteamentos novos, áreas industriais e comerciais em implantação, que correspondem à classe urbana, não foram classificadas corretamente.

A classe área urbanizada foi separada da classe vegetação por meio dos valores da imagem do NDVI utilizados como atributo, inclusive da que ocorre no interior da área urbana (mata ciliar, parques, bosques, praças). Os resultados finais para a classe Área Urbanizada, obtidos nas classificações das imagens dos anos de 1985 e 1999 são apresentados na Figura 7.

Figura 7-Classificação das imagens TM LANDSAT 5 de 1985 (a) e ETM LANDSAT-7 de 1999 (b) – obtida por análise orientada a objeto.



Pela análise dos resultados apresentados na figura 7 verificou-se que as áreas agrícolas com solo preparado para plantio não foram classificadas como urbanas, como ocorreu na classificação baseada em pixels, com um único nível de segmentação, em que é considerada apenas a característica espectral dos alvos. Outro aspecto observado é que a metodologia utilizada permitiu que as manchas urbanas fossem classificadas sem a inclusão das áreas de pastagem em relevo colinoso, as quais apresentam elevada porcentagem de solo exposto e possuem resposta espectral semelhante às áreas urbanizadas.

Os loteamentos com baixa densidade de construção, como aqueles que apresentam um padrão de loteamento de chácaras, não puderam ser classificados como áreas urbanizadas devido aos altos índices de vegetação na imagem de 1985 (Figura 7ª). Este tipo de erro poderia ser reduzido dentro da própria rede hierárquica, subdividindo-se a área urbanizada em densa e esparsa. Nesta última poderia ser utilizado um intervalo de valores de NDVI como atributo da classe, uma vez que estas áreas apresentam valores semelhantes aos das áreas cobertas por vegetação.

A Tabela 1 mostra o resultado da comparação entre a classificação realizada no Definens para o ano de 1985 e o Mapeamento de Uso da Terra de São José dos Campos quanto à classe Área Urbanizada. As demais classes obtidas foram agrupadas em Não-Urbanizada.

Tabela 1 – Matriz de erros e valores dos índices Kappa e exatidão global resultantes da Classificação Orientada a Objeto da imagem de 1985.

<i>Dados de referência</i>	<i>Classificação</i>		
	Urbanizada	Não urbanizada	Total
Urbanizada	130	19	149
Não urbanizada	71	165	236
Total	201	184	385

Exatidão global: 0,77

Índice Kappa: 0,54

Conforme apresentado na Tabela 1, obteve-se os valores de 0,77, Exatidão Global, e de 0,54 para o índice Kappa. Este último, segundo Landis and Koch (1977), indica uma boa concordância entre os resultados da classificação orientada a objeto e o mapa de referência. Observa-se ainda que os erros de inclusão foram superiores ao de omissão. Na comparação com o Mapa de Uso da Terra utilizado pode-se verificar que os erros de inclusão estão associados, em sua maior parte, as áreas classificadas como pastagem melhorada e pastagem e/ou campo antrópico. Em pequeno número foram associados à classe áreas de empréstimo/movimentos de terra.

Os erros de omissão correspondem às áreas classificadas no mapa referência como chácaras, dentro da classe área urbanizada; indústrias; loteamentos novos; e área institucional. Com relação às chácaras, estas áreas são de uso misto, no qual ocorrem a presença de chácaras de recreação e domicílios permanentes.

Além dos erros de classificação propriamente ditos, os erros de omissão e inclusão representam a diferença na identificação e delimitação dos usos nos sistemas manuais e automáticos de classificação. Assim, na delimitação manual de uma área de indústria, por exemplo, usando imagens de alta resolução espacial são considerados os diferentes tipos de alvos (áreas construídas, vegetação e água) que

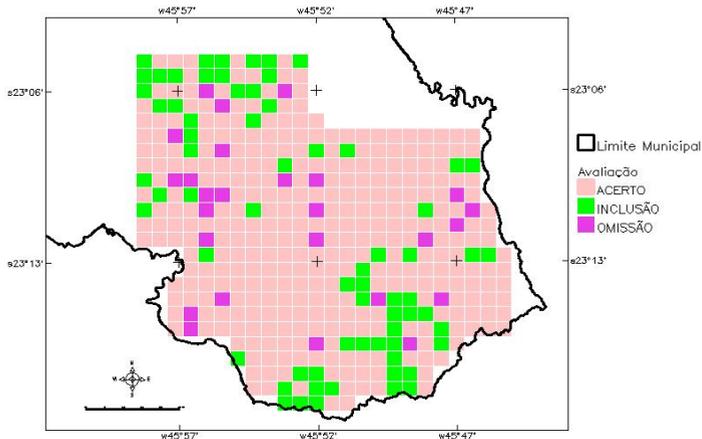
a compõem. No uso de um classificador automático, essa diversidade dificulta a delimitação precisa desse tipo de classe, pois são mapeadas principalmente as áreas impermeabilizadas. Na área de estudo, a presença de uma área institucional de grande porte, como o Centro Técnico Aeroespacial – CTA, o qual apresenta uma extensa área de vegetação natural em seu perímetro, teve grande influência nos erros de omissão, correspondendo a aproximadamente 20% deste.

Nesse sentido, no Mapa de Uso da Terra do Município de São José dos Campos (São José dos Campos, Prefeitura, 1985), utilizado como referência, os limites das diferentes classes de uso do solo foram determinados a partir da interpretação de fotografias aéreas, representando, na maioria dos casos, os limites dos lotes. No método automático de classificação aqui avaliado, estas propriedades são representadas pelos limites de suas coberturas naturais do solo e áreas impermeabilizadas, já que o uso do solo não pode ser inferido, principalmente devido à resolução espacial das imagens de satélite aqui utilizadas.

Na avaliação da classificação da imagem de 1999, os erros de omissão e inclusão foram facilmente identificados no mosaico digital. Uma vez que não surgiram dúvidas de identificação das áreas urbanizadas neste produto, não houve necessidade de realizar uma verificação de campo.

A Figura 8 mostra a distribuição espacial dos erros de omissão e inclusão dominantes (por quadrícula) resultantes da classificação da imagem do ano 1999. De um total de 423 quadrículas analisadas, 329 tiveram concordância com o mosaico de referência utilizado; 26 apresentaram erros de omissão, enquanto 68 apresentaram erros de inclusão.

Figura 8 – Distribuição espacial dos erros de omissão e inclusão (dominantes por quadrícula) obtidos na classificação da imagem de 1999.



Os erros de omissão ocorreram em menor número, em relação aos erros de inclusão, e encontram-se associados: a áreas edificadas junto a estradas vicinais com arruamento formado apenas por uma ou duas vias, constituindo-se em aglomerações de desenvolvimento linear junto a estradas que funcionam como ponto inicial e a partir das quais se desenvolvem transversalmente; a áreas em consolidação com baixa densidade de residências.

Os erros de inclusão que provocaram superestimativa das áreas urbanizadas correspondem a áreas de pastagem, na maior parte dos casos, ou campo antrópico com edificações esparsas. Grandes áreas em extensão territorial, adjacentes às edificações isoladas, principalmente no norte da área do município avaliada, foram classificadas como urbana. Embora apresentem ocupação rarefeita em edificações isoladas, a dominância é de áreas não urbanizadas. Estas correspondem a áreas ocupadas por vegetação de gramíneas e pastagem, ou campos antrópicos, em relevo colinoso com vertentes iluminadas. Verificaram-se também erros de inclusão, junto à área urbanizada consolidada principal, relativos a áreas em que o solo encontra-se exposto devido a processos de erosão.

Na franja rural urbana houve ainda erro relacionado à classificação de áreas de granjas. O material da cobertura dos galpões utilizados para a confinamento das aves apresentou a mesma resposta espectral e forma regular que as áreas urbanizadas. Na região sul do município a rotatória do entroncamento de rodovias intermunicipais foi classificada como urbana caracterizada assim como erro de inclusão. A Tabela 2 mostra os erros de omissão e inclusão relativos à classificação do ano 1999.

Tabela 2 – Matriz de erros e valores dos índices Kappa e Exatidão Global resultantes da Classificação Orientada a Objeto da imagem de 1999.

<i>Dados de referência</i>	<i>Classificação</i>		
	Urbanizada	Não urbanizada	Total
Urbanizada	126	26	152
Não urbanizada	68	203	271
Total	194	229	423

Exatidão Global: 0,78

Índice Kappa: 0,55

De acordo com os valores de exatidão global (0,78) e índice Kappa (0,55) obtidos da classificação da imagem de 1999 os resultados podem ser considerados bons sendo semelhantes aos da imagem de 1985. Na avaliação da classificação por regiões da imagem de 1999, os erros de omissão e de inclusão foram superiores àqueles obtidos pela classificação orientada a objeto das duas imagens (1985 e 1999) resultando em um índice Kappa de 0,26 e de Exatidão Global 0,62 (TABELA 3).

Tabela 3 – Matriz de erros e valores dos índices Kappa e Exatidão Global resultantes da Classificação por regiões da imagem de 1999.

<i>Dados de referência</i>	<i>Classificação</i>		
	Urbanizada	Não urbanizada	Total
Urbanizada	153	41	194
Não urbanizada	121	110	231
Total	274	151	425

Exatidão Global: 0,62

Índice Kappa: 0,26

Verifica-se pela análise da Tabela 3 a ocorrência de elevada porcentagem de erros de inclusão. Estes erros foram obtidos pela classificação de áreas agrícolas, áreas de campo antrópico junto a áreas urbanas consolidadas, como área urbanizada, conforme análise do mapeamento realizado. Isto ocorre devido à semelhança destas classes quando se considera somente a variável espectral. Também foi considerada como urbana grande parte da rodovia Carvalho Pinto, localizada no sul do Município. Os erros de omissão correspondem em sua maior parte a áreas da franja rural urbana, e a áreas internas ao núcleo urbano consolidado como, por exemplo, áreas de crescimento vertical devido ao efeito do sombreamento que influencia a resposta espectral das edificações urbanas.

Na análise qualitativa dos dados verifica-se que a opção de classificação orientada a objeto discriminou de maneira geral as áreas urbanizadas. Isso ocorreu tanto na franja rural urbana espacialmente adjacente à área urbanizada contínua, com exceção das áreas de granjas, como em áreas mais distantes ocupadas por edificações mais espaçadas territorialmente. Na área intra-urbana também foram identificadas áreas não edificadas como grandes vazios urbanos.

Os resultados obtidos neste trabalho foram influenciados: pelas características das áreas urbanas que têm grande heterogeneidade de alvos; pela resolução espacial dos dados analisados; pela data de aquisição das imagens que interfere nas condições climáticas e ambientais e, conseqüentemente, na representação dos alvos; pelo sistema de amostragem utilizado na avaliação que priorizou as áreas mais urbanizadas (críticas em termos de separabilidade de alvos); pela resolução da grade utilizada na avaliação dos resultados.

6. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida neste trabalho para o mapeamento de áreas urbanizadas, ao reunir as vantagens da análise orientada a objeto como o uso de variáveis cognitivas (textura, forma, contexto, etc.) e a segmentação multiresolução com aquelas fornecidas pelas imagens de média resolução espacial, como a

possibilidade de mapear e monitorar extensas áreas com baixo custo potencializa a exploração desse tipo de dados.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam a viabilidade do uso da classificação orientada a objeto no mapeamento de áreas urbanizadas a partir de imagens de média resolução espacial. Deste modo, eles mostram que esse método de classificação tem um grande potencial para o mapeamento de áreas urbanizadas, não somente com a utilização de imagens de alta resolução espacial, como vem ocorrendo, mas também com a de imagens de média resolução.

Na aplicação da classificação orientada a objeto, quando comparada com métodos tradicionais de classificação verifica-se um maior grau de confiabilidade na separação da classe área urbanizada, destacando-se a discriminação entre áreas construídas e solo exposto de culturas agrícolas e na identificação dos vetores de crescimento urbano. Com as novas formas de urbanização que estão ocorrendo, através da formação de núcleos dispersos, surge a necessidade de dados atualizados sobre a distribuição espacial destas áreas, para a orientação de políticas públicas em direção a um crescimento urbano inteligente em equilíbrio com o ambiente natural. Estes dados poderão ser obtidos em um primeiro momento a partir da classificação orientada a objeto de imagens orbitais, como mostrado no trabalho desenvolvido, e refinados através de verificação de campo.

– BIBLIOGRAFIA

- ANTUNES, A., F., B. *Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial*. 2003. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.
- ANTUNES, A., F., B.; CORTESE, S., C. *Determinação de áreas de ocupação irregulares por meio de análise orientada a objeto*. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis-SC, 21 a 26 de abril de 2007, INPE, p.481-487.
- ARAÚJO, E. H. G. *Análise multitemporal de cenas do satélite QuickBird usando um novo paradigma de classificação de imagens e inferências espaciais. Estudo de caso: Belo Horizonte, MG*. 2006. 175 p. (INPE-13956-TDI/1062). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.43>>. Acesso em: 02 dez. 2007.
- BONDUKI, N. *Sem erros do Passado*. Jornal Folha de São Paulo, 28 de abril de 2005.
- BRUZZONE, L.; CARLIN, L. *A Multilevel Context- Based System for Classification of Very High Spatial Resolution Images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, No. 9, September 2006, pp. 2587 – 2600.
- Carmo, P. L.; Hogan, D. J. *Questões ambientais e riscos na Região Metropolitana*

- de Campinas*. in *Novas Metrôpoles Paulistas População, Vulnerabilidade e Segregação*, Campinas, Unicamp, (2006) pp.581-604.
- CHUBEY, M.S.; FRANKLIN, E.; WULDER, M.A. *Object – Based Analysis of Ikonos -2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 72, No.4, April 2006, pp.383 - 394.
- Definiens, *eCognition: User Guide 5*, 44 p., 2005. Disponível em: <http://www.definiens.com/services/faq/Definiens_Professional5_InstallationGuide.pdf>., Acesso em 09 de maio 2006.
- HASSE, J. E. AND LATHROP, R. *G.A Housing-Unit Level Approach to Characterizing Residential Sprawl*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, V.69, No.9, September 2003, pp. 1021-1030.
- LEE, S.; LATHROP, G. *Sub pixel Analysis of LANDSAT ETM+ Using Self-Organizing Map (SOM) Neural Networks for Urban Land Cover Characterization*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, No. 6, June 2006, pp. 1642 – 1654.
- MAKTAV, D. *Remote Sensing of Urban Areas*. International Journal of Remote Sensing, v.26, No.4, February, 2005.
- MITRI, G.H.; GITAS, I. Z. *A performance evaluation of a burned area object-based classification model when applied to topographically and non-topographically correct TM imagery*. International Journal of Remote Sensing, vol.25, No.14, July 2004, pp.2863-2870.
- MOREIRA, A. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; Cálculo do Índice de Vegetação a partir do sensor AVHRR. In: Ferreira, N. J. (cor.) *Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N*. São Paulo, Oficina de Textos, 2004 cap. 4, p 79-103.
- PEREIRA, M. N.; GONÇALVES, C. D. A. B.; SOUZA, Í. DE M.; GARCIA, S.; PORTELA, A. G.; ALMEIDA, C. M.; ROSEMBACK, R.; FLORENZANO, T. G.. *Uso de imagens de satélite como subsídio ao estudo do processo de urbanização*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. 39 p. (INPE-12912-RPQ/251). Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/iris@1912/2005/09.29.12.22>>.
- PINHEIRO, E. S., KUX, H. *Imagens QuickBird Aplicadas ao Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata*. In *Sensoriamento Remoto e SIG Avançados: novos Sistemas Sensores e Métodos Inovadores*. São Paulo, Oficina de Textos, 2005, 286 p..
- PINHO, C. M. D. *Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos*. 2005. 180 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em:

- <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/11.23.13.40>>. Acesso em: 02 dez. 2007.
- Reis, N. G. *Notas Sobre Urbanização Dispersa e Novas Formas de Tecido Urbano*. São Paulo, Via das Artes, 2006.
- ROCHA, A. D. *Estabelecimento de Metodologia de Classificação de Imagens de Alta Resolução para Identificar e Avaliar o Crescimento e Áreas de Ocupação Irregular*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, agosto 2007.
- São José dos Campos, Prefeitura Municipal. *Mapa de Uso da Terra do Município de São José dos Campos*. São José dos Campos, 1985.
- SMALL, C. *A global analysis of urban reflectance*. International Journal of Remote Sensing, v.26, No.4, February 2005, pp.3403-3412.
- TULLIS, J.A.; JENSEN, J.R. *Expert System House Detection in High Spatial Resolution Imagery Using Size, Shape, and Context Geocarto*. International, Vol.18, No.1, March 2003.
- YAN, G.; MAS, J. -F.; MAATHUIS, B.H.P.; XIANGMIN,Z.;VAN DIJK, P.M. *Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches- a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China*. International Journal of Remote Sensing, vol. 27, Nos. 18-20, September-October, 2006, pp. 4039-4055.

(Recebido em agosto / 2008. Aceito em março / 2009).