

Aplicação dos sistemas de sensoriamento remoto por imagens e o planejamento urbano regional

*Cláudia Maria de Almeida**

Application of remote sensing systems through images and urban local planing

RESUMO: Este artigo destina-se a fornecer uma visão panorâmica sobre os recentes avanços em sensoriamento remoto, revelando o potencial das novas tecnologias disponíveis atualmente para o estudo do espaço urbano. Alguns dos tópicos a serem tratados envolverão o uso de sensores orbitais e aerotransportados para a modelagem tridimensional de cidades e reconstituição virtual do ambiente urbano, inferência populacional intercenso e estudos de qualidade de vida urbana e de indicadores socioeconômicos. O uso de dados de sensoriamento remoto para a investigação de mudanças ambientais globais e desastres naturais em cidades será igualmente explorado. Ênfase especial será dada às inovadoras possibilidades de simulação e predição do crescimento urbano, com base no uso de imagens de satélite e plataformas computacionais de modelagem dinâmica espacial.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, planejamento urbano e regional, modelagem tridimensional de cidades, modelos de mudanças do uso do solo urbano.

Abstract: This article is committed to provide an overview on recent advances in remote sensing, revealing the potential of new technologies currently available for the study of urban areas. Some of the topics to be approached deal with the use of orbital and airborne sensors for the 3D modelling of cities and virtual construction of the urban environment, population estimates as well as studies on urban life quality and socioeconomic indicators. The use of remotely sensed data to investigate the global environmental change and natural hazards in urban areas will also be explored. Special emphasis will be given to the innovating possibilities of simulation and prediction of urban growth, based on the use of satellite images and computational frameworks for spatial dynamic modelling.

Keywords: remote sensing, geographical information systems, urban and regional planning, tridimensional modelling of cities, models of urban land use change.

* Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela FAU-USP (1989), tem mestrado (1995) em Infrastructure Planning pelo Centre for Infrastructure Planning, da Universität Stuttgart, doutorado (2002) em Sensoriamento Remoto pelo Centre for Advanced Spatial Analysis, da University College London, e doutorado (2003) em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). É pesquisadora associada II do Inpe e professora credenciada da Unesp, tem experiência na área de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Planejamento Urbano e Regional, com ênfase em Técnica de Previsão Urbana e Regional.

I. Introdução

I.1 O Inpe e a entrada do Brasil na Era Espacial

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, com sede em São José dos Campos, interior de São Paulo, foi fundado em 1971, pela vontade de alguns brasileiros de que o Brasil participasse da conquista espacial iniciada na década de 1950. Inicialmente, esteve sob a égide do CNPq, e depois passou para o Ministério da Ciência e Tecnologia. Já na década de 1970, os projetos do instituto voltavam-se para estudos que se utilizavam de dados de satélites de observação da Terra, meteorológicos e de comunicação. De certa forma, o Brasil ocupou posição de pioneirismo em termos de ciência espacial, pois em 1972, quando foi lançado o primeiro satélite civil comercial de observação da Terra, o ERS (Earth Resources Satellite), que depois veio a se chamar LANDSAT I, apenas os Estados Unidos e o Brasil dispunham de antenas para recepção dos dados.

Atualmente, o Inpe possui sedes em várias cidades do Brasil, assumindo também uma posição de ponta em termos de ciência e aplicações de tecnologias espaciais e contando com um moderno centro de rastreamento e controle de satélites e com o centro de previsão técnico-climática, o CPTEC, que todos conhecemos, uma vez que nos fornece diariamente as previsões a que assistimos nos telejornais. O Inpe mantém em órbita o primeiro satélite brasileiro de Sensoriamento Remoto, construído em parceria com a China, o CBERS (China Brazil Earth Resources Satellite), além de outros satélites de investigação do espaço, construídos igualmente em parceria com outros países, como é o caso do MIRAX, destinado ao estudo de raios cósmicos.

Recentemente, o Inpe apoiou, juntamente com a Agência Espacial Brasileira (AEB) e o Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), o lançamento do primeiro astronauta brasileiro, o tenente coronel Marcos Pontes, à Estação Espacial Internacional (International Space Station – ISS), para fins de realização de experimentos em ambiente de microgravidade. A ISS foi construída com base em um consórcio entre dezesseis países, do qual o Brasil é partícipe por intermédio do Inpe.

1.2 Organograma do Inpe: a Divisão de Sensoriamento Remoto e seu Grupo de Estudos Urbanos

O Inpe possui sete grandes coordenações (Figura 1). A Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (CEP) encarrega-se basicamente dos programas de pós-graduação (*lato e stricto sensu*), nos quais se formam especialistas em Sensoriamento Remoto, além de mestres e doutores em Sensoriamento Remoto, Meteorologia, Astrofísica, Geofísica Espacial, Engenharia e Tecnologia Espaciais e Computação Aplicada.

A Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE), o Centro de Tecnologias Espaciais (CTE) e o Centro Espacial de Cachoeira Paulista (CES) desempenham atividades referentes ao planejamento, construção e avaliação e de sistemas sensores, plataformas orbitais e veículos lançadores. Integrados diretamente a estas coordenações, estão o Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (CRC) e o Laboratório de Integração e Testes (LIT), conhecido internacionalmente como o melhor laboratório neste âmbito no hemisfério sul.



Figura 1 – Estrutura organizacional do Inpe

Por sua vez, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos responsabiliza-se pela pesquisa científica e geração de prognósticos meteorológicos, tanto continentais quanto oceânicos. Já a Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas dedica-se à realização de pesquisas básicas e aplicadas com a finalidade de entender os fenômenos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera e no espaço, como eletricidade da atmosfera, geomagnetismo terrestre e explosões magnéticas solares, entre outros.

Por fim, a Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) incumbe-se de aplicações, tecnologia e desenvolvimento científico relacionados aos estudos dos ecossistemas terrestres e aquáticos por meio do uso de sensores orbitais e aerotransportados. A OBT consiste basicamente em três divisões: a Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), a Divisão de Processamento de Imagens (DPI) e a Divisão de Geração de Imagens (DGI).

A DSR possui um amplo leque de grupos e linhas de pesquisa, que compreendem estudos diversificados, como Engenharia Florestal, Ecologia, Agronomia, Sistemas Aquáticos de Água Doce, Oceanografia, Geologia, Geomorfologia, Biologia, Radiometria, Telemetria, Engenharia de Pesca, além de Planejamento e Gestão Territorial. Esta última linha – Sistemas e Métodos de Planejamento e Gestão Territorial – abriga o Grupo de Estudos Urbanos (GEU), que compreende as seguintes linhas de pesquisa:

• ***Aplicação e Desenvolvimento de Métodos e Técnicas para Extração de Informação de Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial***

Esta linha é voltada para a experimentação e concepção de novas técnicas de processamento digital de imagens visando à extração de informações referentes ao ambiente urbano, como forma de subsidiar as atividades de planejamento e gestão urbana.

• ***Modelagem Dinâmica de Processos Sociais e Ambientais***

Esta linha objetiva (i) simular, em ambiente computacional, fenômenos dinâmicos espaciais, como mudanças de uso do solo urbano, mobilidade intra e inter-regional, processos de microclima urbano etc.; (ii) elencar as forçantes desses fenômenos, avaliando seu grau de importância e impacto na caracterização destes; e (iii) executar simulações de prognóstico, com base em conjeturas diferenciadas de cenários futuros.

- ***Técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG Aplicadas ao Planejamento Urbano e Regional***

Seus objetivos abrangem a utilização de técnicas de geoprocessamento e extração de informações de imagens digitais (orbitais ou aerotransportadas) para estudos urbanísticos, como planejamento de infraestrutura, classificação de uso e cobertura do solo, inferências de contagem e densidade populacional, análise de adequabilidade de sítio, avaliação de riscos ambientais etc.

- ***Geomorfologia em Ambientes Urbanos***

Esta linha dedica-se a analisar a gênese e a morfologia urbanas com base em estudos de geomorfologia, avaliar riscos ambientais e conduzir análises de aptidão de sítio para a ocupação urbana com base na investigação de variáveis geomorfológicas.

- ***Vulnerabilidade Ambiental a Mudanças Globais em Áreas Urbanas***

Nesta última linha, objetiva-se a realização de estudos sobre avaliação de riscos e impactos de desastres naturais e antrópicos em ambientes urbanos, bem como analisar a dimensão humana da vulnerabilidade ambiental a mudanças globais, por meio de métodos qualitativos e quantitativos.

2. Breve histórico do uso do sensoriamento remoto em estudos urbanos

O sensoriamento remoto pode ser entendido como o conjunto de atividades que tratam da obtenção de informação relativa aos recursos naturais da Terra ou seu meio ambiente, por meio de sensores instalados a bordo de plataformas em altitude (tais como balões, foguetes, aviões e satélites), os quais coletam a radiação eletromagnética emitida ou refletida por um alvo, convertendo-a em um sinal que é posteriormente processado em terra, com fins de geração de imagens (SLATER, 1980). Assim sendo, não somente as imagens de satélite, mas também as originadas em plataformas aerotransportadas (aerofotogrametria analógica e digital) constituem a matéria de trabalho do sensoriamento remoto.

A primeira geração de satélites estende-se do começo da década de 1970, com o lançamento do LANDSAT I em 1972, até meados da década de 1980. Essa geração é marcada por uma limitação inerente aos satélites, que apresentavam baixa resolução espacial – em torno de 80 m. Pode-se notar

na Figura 2a, que a área da cena correspondente a uma cidade na imagem de satélite muito pouco informa sobre a complexidade da estrutura urbana à qual ele se reporta, vista na foto aérea na Figura 2b.

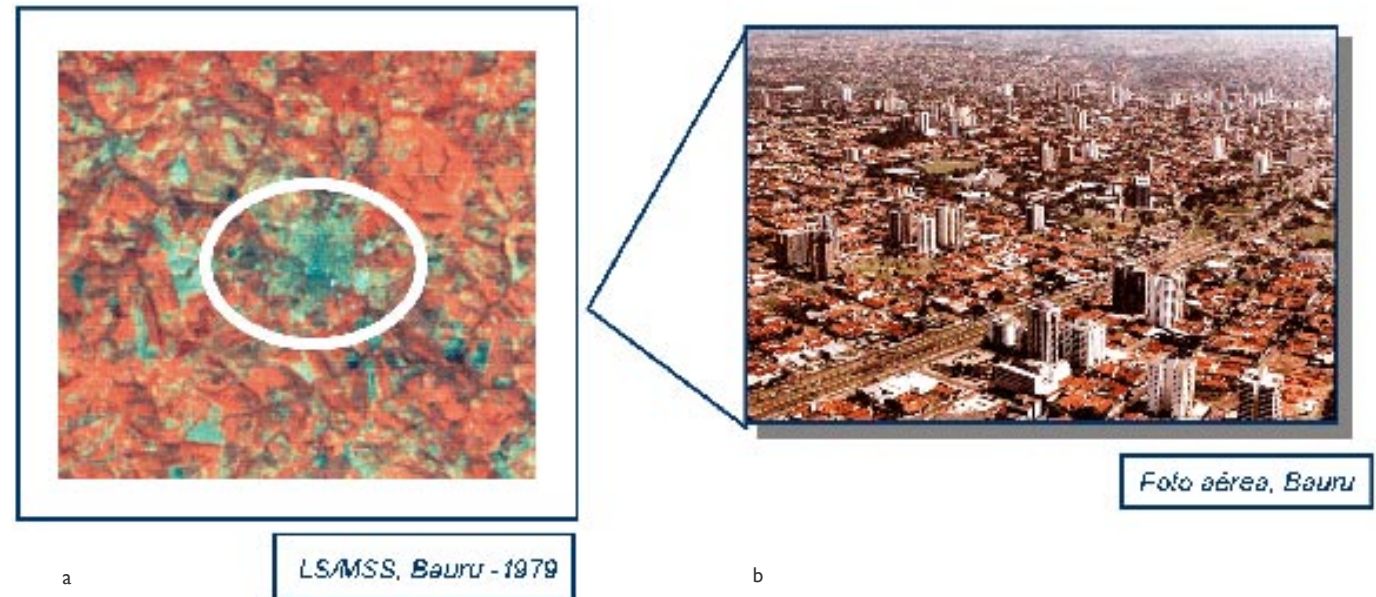


Figura 2 – a. Imagem LS/MSS Bauru em 1979. b. Foto aérea da cidade em 1997. Fonte: Adaptado de ITE (1998).

Apesar de todos os problemas dessa geração, os pesquisadores à época lograram conduzir estudos de classificação de áreas urbanas e não urbanas e realizar o monitoramento de crescimento urbano ao longo do tempo por meio de séries multitemporais de imagens, e, por fim, produziram avaliações pioneiras sobre o impacto ambiental da ocupação urbana diante das condições do sítio físico com base em imagens de satélite, além de terem realizado as primeiras tentativas de inferência ou estimativas da população com base nessas imagens.

A geração subsequente tem início em meados da década de 1980 e prolonga-se praticamente até o final da última década. Essa geração possibilitou-nos importantes avanços; os satélites americanos pas-

sam a ter sua resolução espacial bastante refinada, saltando de 80 m para 30 m. Surgem os satélites franceses da série SPOT, com resolução de 20 m nas bandas multiespectrais e de 10 m na banda pancromática. Em um exemplo de imagem da segunda geração (Figura 3), podemos notar que há um detalhamento maior das estruturas urbanas em comparação com as imagens da primeira geração.

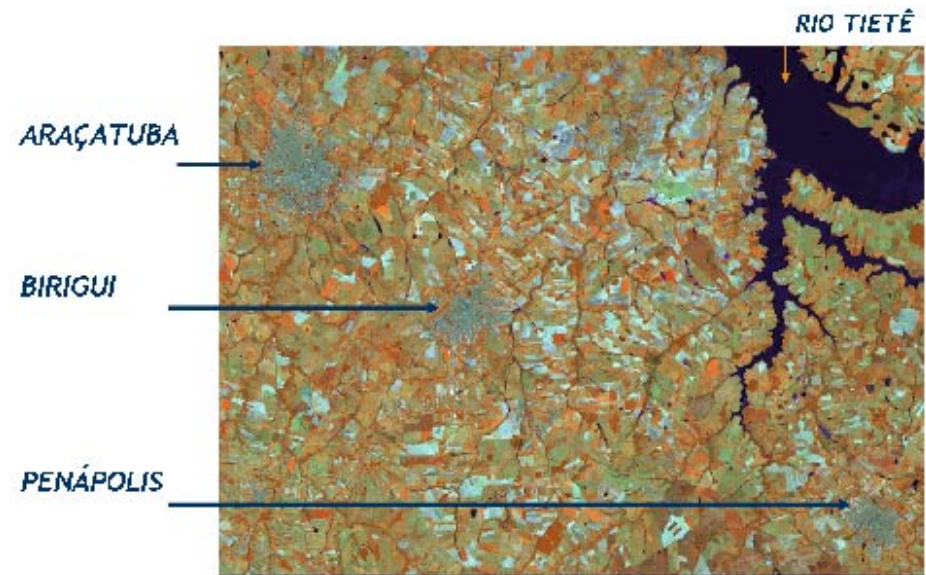


Figura 3 – Imagem LS/TM de cidades do oeste paulista – WRS: 222.75B, 31/07/1988.

A aerofotogrametria digital ganha novo impulso com as novas tecnologias de câmeras digitais. Novos radares com resolução espacial refinada também datam dessa época, e é também na segunda geração que entra em cena nosso primeiro satélite de sensoriamento remoto, construído em parceria com a China. O CBERS constitui um programa de longo prazo, que prevê o lançamento de uma família de satélites, da mesma forma que o Programa SPOT da França e o Programa LANDSAT dos EUA. Atualmente, encontra-se em órbita o CBERS-2B, que possui um sensor pancromático de alta resolução espacial (2,5 m), chamado High Resolution Camera (HRC). A Figura 4 apresenta uma imagem fusionada do HRC com as bandas multiespectrais CCD.

Figura 4 – Imagem CBERS-2B/HRC/ CCD do Aeroporto de Cumbica (SP), 14/03/2008.



Nessa segunda geração, os estudos de monitoramento do crescimento ganham em precisão. Pela primeira vez, lançam-se olhares sobre o espaço intraurbano; surgem as primeiras fusões de imagens ópticas com aerofotos e as obtidas com radar, visando ao refinamento da resolução espacial. Isso só foi possível porque houve um avanço paralelo nas tecnologias de sistemas sensores e nas técnicas computacionais de processamento de imagens.

Finalmente, encontramos hoje no que se convencionou denominar a Terceira Geração de Satélites Imageadores, que vai do final da década passada até a atualidade. Ela representa um marco em termos de revolução na resolução espacial. Os satélites americanos QuickBird, IKONOS e ORBVIEW, bem como o satélite israelense EROS e o francês SPOT têm as suas resoluções espaciais oscilando entre 67 cm, com o QuickBird; 1 m, com o ORBVIEW; 1,8 m, com o EROS, e 2,5 m, com o SPOT 5. Esses avanços representam novos caminhos para explorar o espaço intraurbano.

Em uma análise comparativa de cenas do Capitólio em Washington (Figura 5), a edificação e os jardins adjacentes são plenamente discerníveis na imagem IKONOS, com 1 m de resolução, apresentando-se ligeiramente borrada na imagem do satélite indiano IRS (Indian Resources Satellite), com 5 m de resolução. Na imagem da banda pancromática do SPOT, com 10 m de resolução, o corpo principal

do edifício é identificável, porém se encontra bastante descaracterizado, ao passo que nas imagens multiespectrais do SPOT e do LANDSAT, respectivamente com 20 m e 30 m de resolução espacial, a detecção do edifício do Capitólio é praticamente impossível.

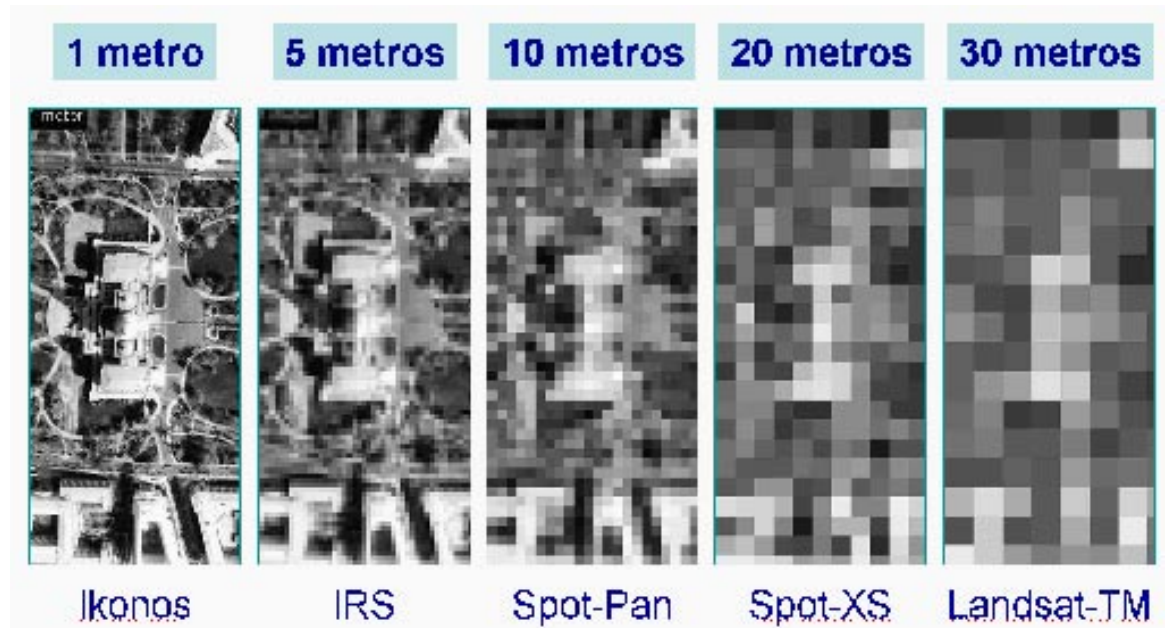
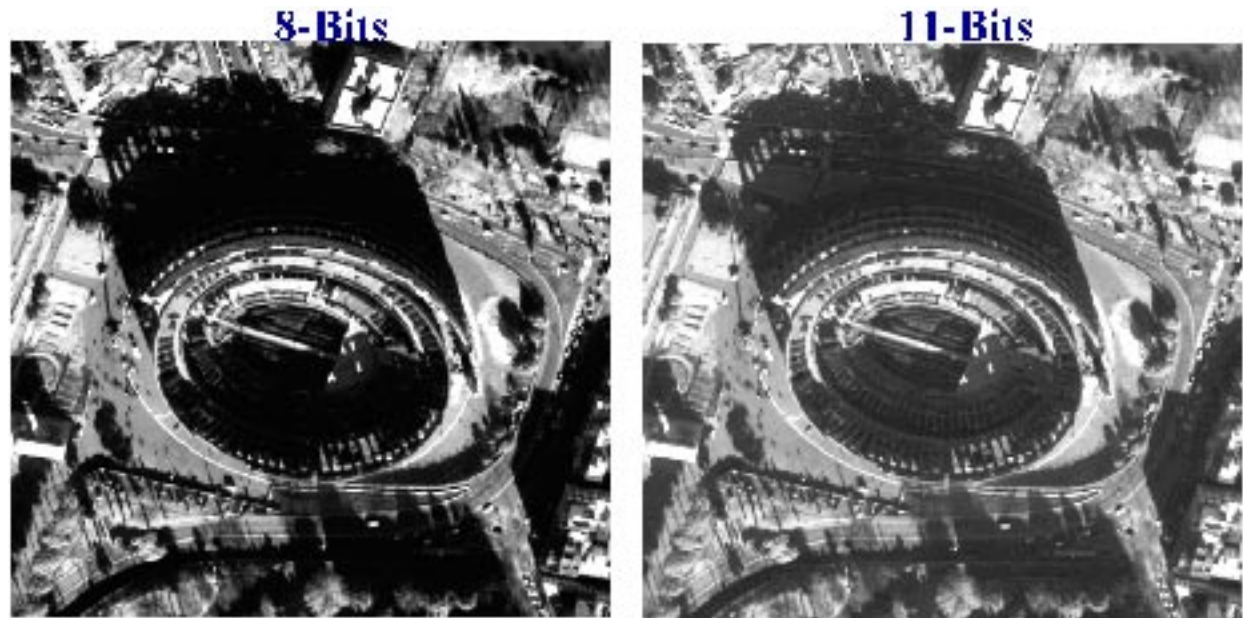


Figura 5 – Capitólio em Washington, DC (EUA), em imagens de diferentes resoluções. Fonte: Machado e Silva (2002).

É importante realçar que esses satélites migraram do setor militar para a pesquisa científica civil no final da última década. Um exemplo da riqueza de detalhes permitida por essa nova geração é a possibilidade de visualização de veículos de passeio. Em uma imagem QuickBird do Coliseu de Roma, por exemplo, é possível observar outro diferencial das imagens da terceira geração: a melhor resolução radiométrica, que se eleva de 8 para 11 bits. Ao comparar uma imagem do Coliseu com 8 bits em relação à do QuickBird com 11 bits (Figura 6), nota-se que, em áreas sombreadas na segunda imagem, é possível a visualização de canteiros, jardins e veículos, os quais não são vistos na área sombreada da imagem com 8 bits.

Figura 6 – Imagem QuickBird pan-cromática do Coliseu de Roma com 8 bits (esq.) e 11 bits (dir.). Fonte: Machado e Silva (2002).



3. Aplicações de sensoriamento remoto para o planejamento urbano e regional

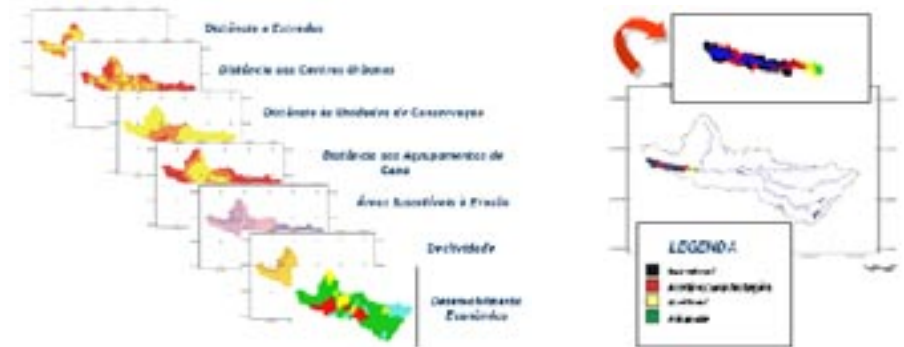
O sensoriamento remoto oferece inúmeras possibilidades para aplicações em planejamento urbano e regional. Esta seção abordará a ampla diversidade de tópicos no âmbito de planejamento que podem utilizar-se de imagens adquiridas por sensores orbitais e aerotransportados.

3.1 Análise de aptidão do uso do solo

Mapas digitais, em alguns casos derivados de informações extraídas com base em imagens de satélite, são úteis para alimentar análises de aptidão de sítio, destinadas a encontrar localizações ótimas para determinados usos do solo. Um exemplo neste sentido diz respeito a um trabalho para seleção de um

local para implantação de um terminal hidroviário intermodal de cargas no rio Piracicaba, ao longo do qual *ferries* transportam cana-de-açúcar bruta. Diferentes variáveis biofísicas e socioeconômicas foram combinadas de forma conjunta em uma análise *Fuzzy Gama* (Figuras 7a e 7b), capaz de superar as limitações de operações convencionais, como a lógica booleana ou a média ponderada. Não somente um, mas vários cenários são possíveis, de acordo com flutuações no valor do índice Gama, que integra as equações do método *Fuzzy Gama*.

Figura 7 – Análise de aptidão de sítio para implantação de terminal hidroviário intermodal no rio Piracicaba navegável. a. Variáveis utilizadas. b. Resultado por categorias de aptidão em um *buffer* de 2 km em ambas as margens do trecho navegável, espacializadas no mapa do município de Piracicaba (SP). Fonte: Almeida *et al*(2001).



3.2 Classificação de cobertura e uso do solo urbano

Em relação ao tópico de classificação de cobertura e uso do solo urbano, uma tendência em trabalhos recentes é a utilização da chamada “análise de imagem orientada a objeto” (“Object-Based Image Analysis”, em inglês, ou OBIA). A OBIA pressupõe o uso de redes semânticas e múltiplos níveis de classificação interligados, de modo que se possa simular a visão contextual de um intérprete humano. Um exemplo de aplicação de OBIA para a classificação de cobertura e uso do solo urbano em um setor de São José dos Campos (SP) é apresentado de modo esquemático na Figura 8, em que uma rede semântica de duplo estágio empregou uma imagem do satélite QuickBird e um *layer* de SIG contendo o arruamento da área em estudo, localizado no nível 3 da rede; além de uma classificação de grandes alvos, como vegetação, áreas construídas e solo exposto e sombra no nível 2. Observando esses dois níveis, uma classificação de cobertura do solo urbano foi executada no nível 1, identificando diferentes materiais

de cobertura, tais como asfalto, solo, vegetação arbórea e rasteira e outros. Em um segundo estágio, um *layer* binário mostrando áreas acima e abaixo de um limiar de densidade de arborização viária foi inserido no nível 6, e uma discriminação entre quadras residenciais e não residenciais foi atribuída ao nível 5. Observando simultaneamente os níveis 1, 5 e 6, foi executada uma classificação de uso do solo urbano referente à identificação de zonas residenciais homogêneas no nível 4. Assim, os níveis de 1 a 3 referem-se ao primeiro estágio do processo de classificação, levando em consideração informação sobretudo geométrica e espectral, e os níveis 4, 5 e 6 referem-se ao segundo estágio, considerando principalmente informação topológica e de relacionamento entre classes.

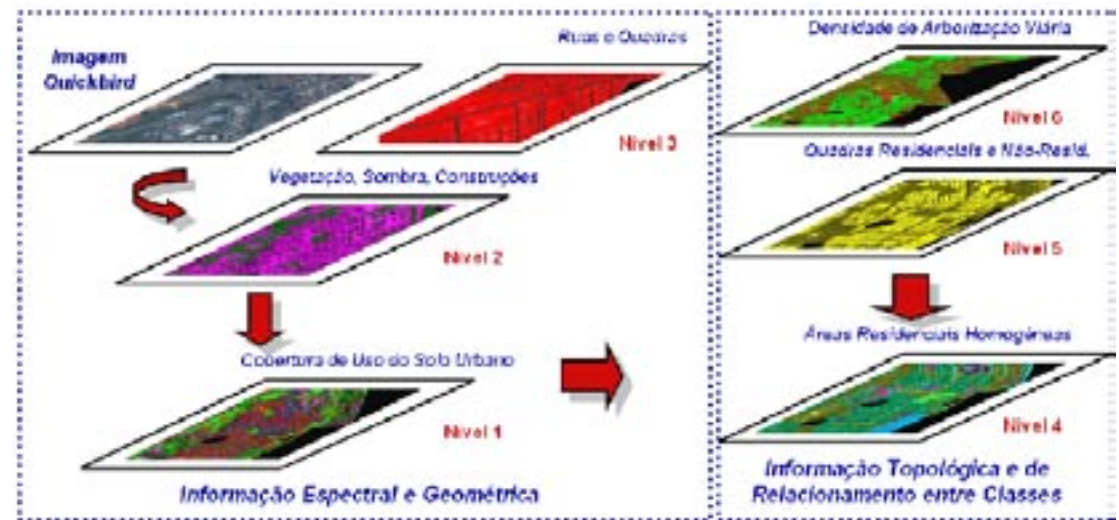
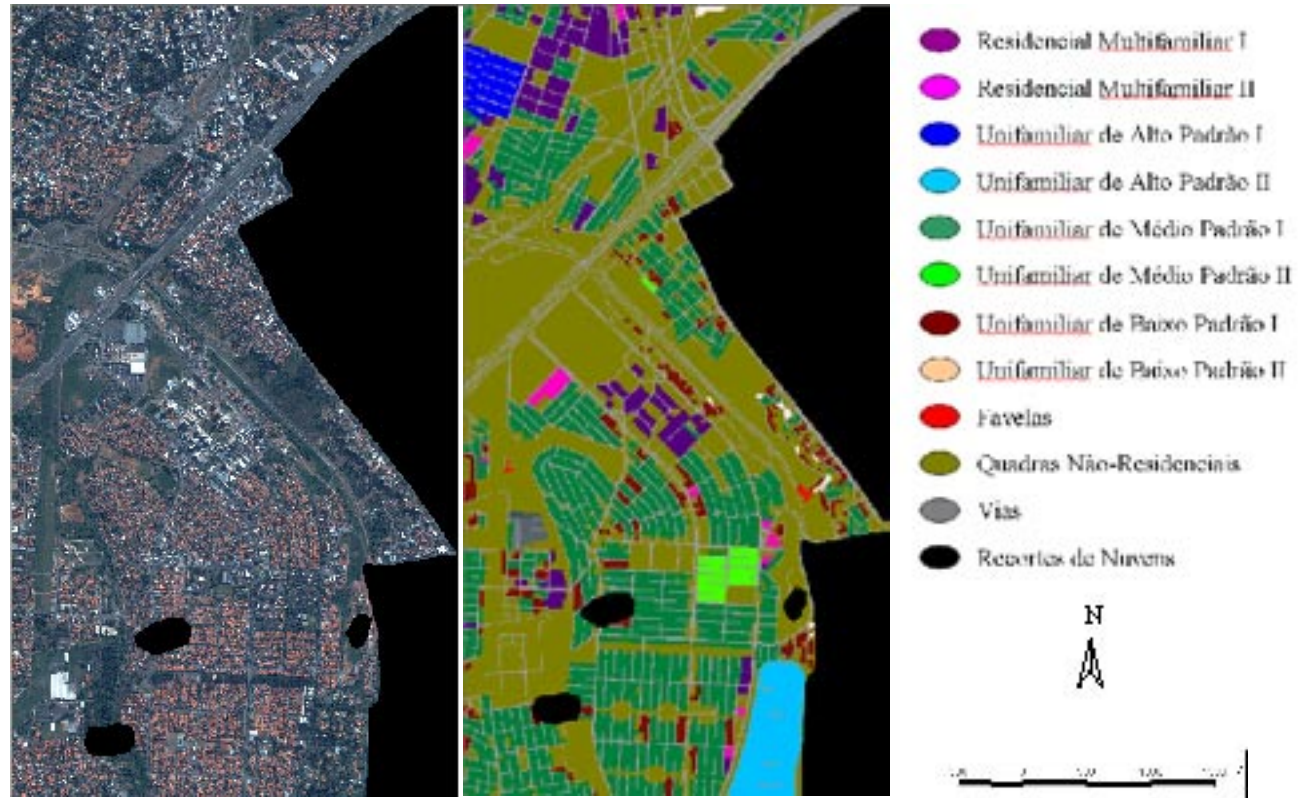


Figura 8 – Níveis de classificação orientada a objeto de cobertura e uso do solo urbano. Fonte: Almeida et al. (2009a).

A Figura 9 apresenta a classificação de áreas residenciais homogêneas, realizada no nível 4, que consiste no produto final do processo de interpretação de imagem orientada a objeto para um setor sul da cidade de São José dos Campos (SP).

A Figura 10 apresenta um exemplo de atributos selecionados para classificar zonas residenciais homogêneas de médio padrão dos tipos I e II. Os atributos são exatamente os mesmos em ambos os casos, mas eles diferem de acordo com a curva de pertinência *fuzzy* criada para cada classe. Assim, as diferentes proporções de cobertura da terra decidem o tipo de zona residencial homogênea na cena. O Tipo I apresenta maior proporção de telhados cerâmicos, e o Tipo II,

Figura 9 – Imagem QuickBird (esq.) de um setor sul da cidade de São José dos Campos (SP) e respectiva classificação de áreas residenciais homogêneas (dir.).
 Fonte: Almeida *et al.* (2009a).

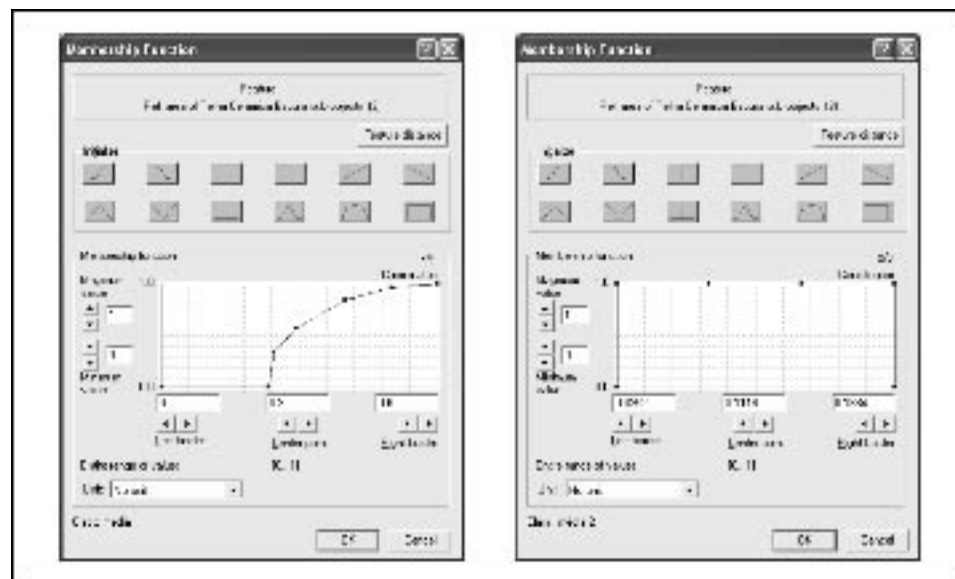


maior proporção de telhados de cimento amianto. Por esse motivo, a curva de pertinência *fuzzy* para o atributo “Telha Cerâmica Escura” relativa ao Tipo I cresce exponencialmente a partir de certo limiar, enquanto ela é uma curva estanque, dentro de um intervalo de valores, no caso do Tipo II.

3.3 Estudos socioeconômicos urbanos

No que diz respeito a estudos socioeconômicos urbanos, muitas análises têm sido feitas utilizando ferramentas avançadas de análise espacial. As figuras 11a a 11d, a título de exemplo, mostram diferentes mapas que espacializam o índice de exclusão social, construído principalmente com base em variáveis

Figura 10 – Curvas de pertinência *fuzzy* com relação ao atributo “Área Relativa de Telha Cerâmica Escura” para as casas unifamiliares de Médio Padrão do Tipo I (esq.) e do Tipo II (dir.). Fonte: Almeida et al. (2009a).



relacionadas aos níveis de renda e educacional dos habitantes do município de São José dos Campos (SP). Esse índice foi criado pela pesquisadora Aldaiza Sposati, da PUC-SP.

O Índice Local de Moran determina a autocorrelação espacial entre polígonos (neste caso, os setores censitários de São José dos Campos). Altos valores indicam áreas de associação espacial, tanto positiva, dizendo respeito a inclusão social, quanto negativa, referente à exclusão social. LISA é um acrônimo que corresponde a Local Indicator of Spatial Association, e o LISA Map mostra agrupamentos de valores similares de um dado atributo (neste caso, a exclusão social). O Box Map avalia áreas de acordo com o *status* de sua vizinhança, indicando áreas de estacionariedade, *i.e.* os vizinhos de um setor apresentam o mesmo comportamento do setor em análise (tanto positivo quanto negativo), bem como áreas de transição, nas quais os vizinhos apresentam um comportamento discordante. E o Mapa de Moran faz exatamente o mesmo que o Box Map, mas considera apenas as áreas estatisticamente significantes de acordo com o LISA e o Box Map.

Diferentes métodos de análise espacial podem revelar diferentes aspectos de um dado fenômeno social. A Figura 12 corresponde a outro trabalho na mesma linha e apresenta um mapa no canto

superior esquerdo em que o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH, indicador criado pela ONU) foi espacializado para diferentes municípios do estado de São Paulo de acordo com *quantis*, i.e. de forma discretizada. No mapa inferior à direita, o mesmo índice foi espacializado de forma contínua, por meio de *krigagem* ordinária, que representa um método de interpolação espacial, gerando uma

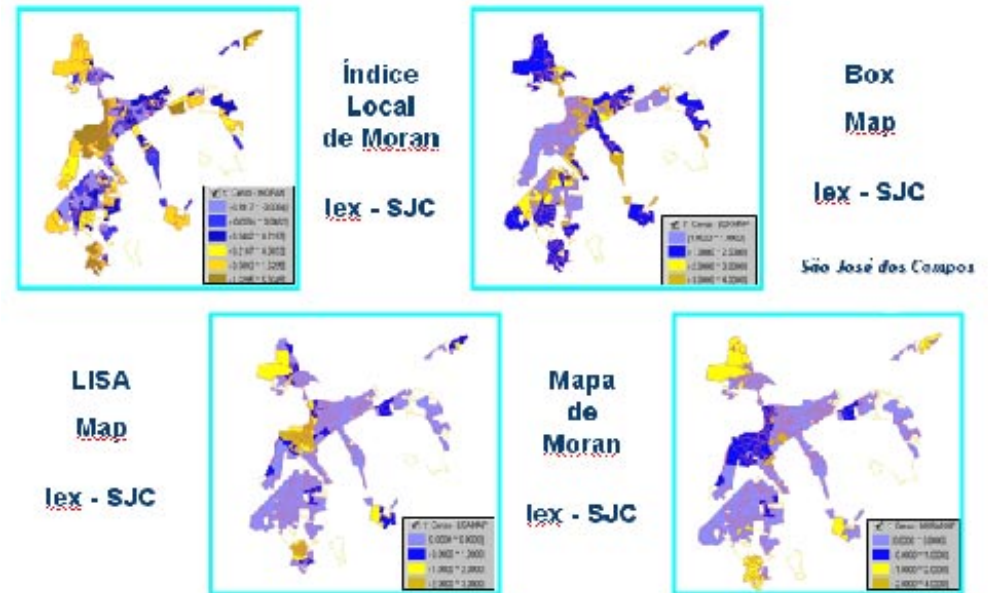


Figura 11 – Diferentes espacializações do Índice de Inclusão/Exclusão Social para os setores censitários de São José dos Campos (SP): a. Índice Local de Moran; b. Box Map; c. LISA Map; d. Mapa de Moran. Fonte: Genovez (2002).

superfície que revela vetores e tendências espaciais de aumento e decréscimo desse índice. Isto é o que os cientistas de geoinformação chamam de “topografia social”.

3.4 Inferência populacional urbana

Técnicas diferenciadas têm sido empregadas para a inferência de população em áreas urbanas. Amaral e colaboradores (2006), por exemplo, empregaram imagens noturnas do satélite DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) para estimar a população em assentamentos urbanos na Amazônia brasileira por meio do cálculo da área urbanizada, utilizando coeficientes

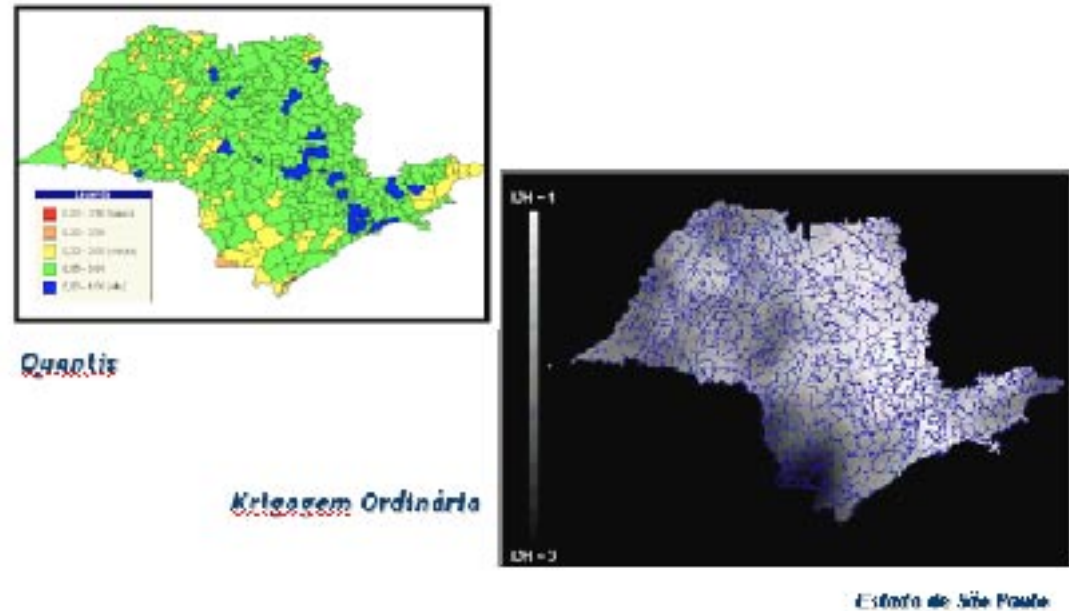


Figura 12 – Espacialização do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) para os municípios do estado de São Paulo por *quantis*, no alto à esquerda, e por meio de *krigagem* ordinária, abaixo à direita. Fonte: Ramos (2002).

de densidade ocupacional específicos. As estimativas foram cruzadas com dados de censo e apresentaram um R quadrado superior a 0,8. O R quadrado é um índice estatístico que se estende de 0 a 1 e mede a proporção da variabilidade na variável resposta (no caso, quantidade de população) que é explicada pela variável independente (a extensão da área urbanizada identificada na imagem noturna do DMSP/OLS pelos *pixels* de alta luminosidade).

Até o presente momento, todos os trabalhos de inferência populacional considerando o cômputo da área urbanizada operaram sobre uma base bidimensional, *i.e.*, superfícies habitáveis planas. Mas uma clara tendência futura será incorporar a terceira dimensão em estudos de inferência populacional, nos casos em que edifícios residenciais multifamiliares estejam presentes. Isto é especialmente aplicável às grandes e médias cidades brasileiras, nas quais há comumente dezenas ou centenas de milhares de edifícios residenciais.

Estimativas populacionais são importantes, sobretudo, em assentamentos informais, uma vez que estes constituem áreas de risco com respeito a aspectos de segurança e de desastres naturais (deslizamentos

de terra, enchentes), e estimativas convencionais baseadas em entrevistas domiciliares são inviáveis do ponto de vista de tempo e de recursos. Em especial nos últimos tempos, estimativas em assentamentos informais tornaram-se cruciais, haja vista o aparecimento de edifícios residenciais multifamiliares nesses loteamentos, em especial, em favelas urbanizadas do Rio de Janeiro.

Um estudo de inferência populacional foi conduzido para a Favela Rio das Pedras, em Jacarepaguá (RJ). Para o cálculo da superfície habitável considerando as edificações verticalizadas, foi gerado um modelo digital de superfície (DSM), construído com base em um par estéreo de imagens pancromáticas do IKONOS. Uma classificação de cobertura do solo orientada a objeto foi feita para a favela, visando a discriminar materiais de cobertura e de pavimentação de forma detalhada. Os setores censitários foram usados para calcular a área projetada da superfície habitável (Figura 13). Para cada um dos setores, todas as áreas correspondentes a classes relacionadas ao uso residencial foram somadas (como amianto, concreto escuro). Grandes edificações não relacionadas ao uso residencial, sombras em ruas, solo exposto argiloso, cursos d'água, edificações com cobertura metálica e vegetação foram excluídos do cálculo.

A população na cidade do Rio em 2000 foi comparada com a população estimada em 2006 (pelo IBGE), determinada por entrevistas domiciliares, feitas por amostragem. O percentual de aumento para toda a cidade foi aplicado a cada um dos setores. A densidade populacional foi calculada de acordo com os dados fornecidos pelo Instituto Pereira Passos (IPP) no Rio, como uma função do total de habitantes da favela dividido pela sua área. Assume-se que a densidade tenha permanecido constante. E, por fim, um fator de altura derivado do DSM foi genericamente aplicado a todos os setores. Um fator de 1,3 foi empregado, correspondendo a 30% do aumento na área projetada. O valor da população total na favela gerado pelas estimativas do IBGE – que representam os dados de referência – e a população calculada pela estimativa por DSM e a classificação orientada a objeto ficaram muito próximos: 43.342 e 43.295 habitantes, respectivamente.

3.5 Planejamento e gestão de transporte urbano

Com relação ao planejamento e gestão de transporte urbano, uma iniciativa digna de menção diz respeito aos ônibus na cidade de Uberlândia, os quais foram dotados de aparelhos de GPS de navegação,

Figura 13 – a. Classificação orientada a objeto de cobertura do solo urbano na Favela Rio das Pedras, Jacarepaguá; b. vista parcial do modelo digital de superfície; c. recortes dos setores censitários com classificação de cobertura do solo, em que lilás é telha de amianto, rosa é cobertura metálica, preto é sombra, vermelho é solo exposto ou telha cerâmica, amarelo é laje de concreto claro, ocre é saibro ou areia, verde é vegetação, e azul, córregos. Fonte: Almeida *et al.* (2009b).



sendo monitorados de uma central de rastreamento. A central acompanha os deslocamentos dos ônibus ao longo da rota, transmitindo para painéis eletrônicos instalados nos pontos o tempo de chegada dos próximos carros em cada uma das linhas que atendem os respectivos pontos. O próprio usuário de transporte coletivo pode consultar o tempo de chegada do próximo carro na Internet, antes de dirigir-se ao ponto de ônibus. Esse sistema também é útil para, em caso de acidentes, obras viárias ou alagamentos, redirecionar a rota dos ônibus em linhas afetadas.

3.6 Mobilidade regional e dispersão urbana

De acordo com urbanistas, os recentes avanços nas tecnologias de transporte e telecomunicações levaram a uma maior interação entre pessoas em extensões cada vez maiores, na qual a escala das atividades diárias não mais se restringe ao âmbito urbano local, mas compreende um conjunto de cidades e áreas metropolitanas em escala regional. Uma vez que as pessoas viajam mais e mais frequentemente, elas tendem a residir em bairros ou condomínios afastados, próximos a rodovias, desencadeando o fenômeno da dispersão. A dispersão é igualmente produzida por loteamentos periféricos de baixo padrão e loteamentos industriais ou mistos (REIS FILHO, 2006).

Um trabalho foi conduzido na cidade de São José dos Campos (SP) para analisar esses fenômenos, em que mais de 4.000 questionários origem-destino regionais foram aplicados por meio de amostragem estratificada nos setores censitários da cidade. Um Índice de Mobilidade Regional (IMR) foi criado para cada setor censitário, considerando a finalidade desses deslocamentos regionais (trabalho, estudo, compras, serviços médicos, lazer; e assim por diante), de acordo com uma escala fixa de valores, bem como a frequência de tais deslocamentos, segundo um intervalo normalizado de valores, no qual quanto maior a frequência, maior o valor atribuído ao correspondente parâmetro na equação. O IMR juntamente com outras variáveis socioeconômicas do censo foram analisados por meio de mapas auto-organizáveis, ou *self-organizing maps* (SOM), que representam uma forma de rede neural artificial não supervisionada, visando a detectar *clusters* (ou agrupamentos) de setores censitários com comportamentos semelhantes em termos de mobilidade regional e padrão socioeconômico. O resultado da análise de SOM foi espacializado sobre os setores censitários de São José, mostrando as áreas de extremamente alto, alto, médio, baixo e extremamente baixo “poder de mobilidade regional”.

Para analisar a dispersão urbana, várias métricas morfológicas foram usadas. As figuras 14a a 14d apresentam a evolução da mancha urbana de São José dos Campos (em azul, o núcleo principal e, em vermelho, os núcleos dispersos) e parte da mancha urbana de Jacareí (em rosa, o núcleo principal e, em salmão e marrom, os núcleos dispersos), nos anos de 1970, 1980, 1990 e 2000. A Figura 14e ilustra um gráfico, indicando o índice de dimensão fractal (FRAC) calculado para o núcleo principal e as manchas urbanas dispersas, ao longo das quatro últimas décadas. O FRAC relaciona em uma escala de log o perímetro e a área das

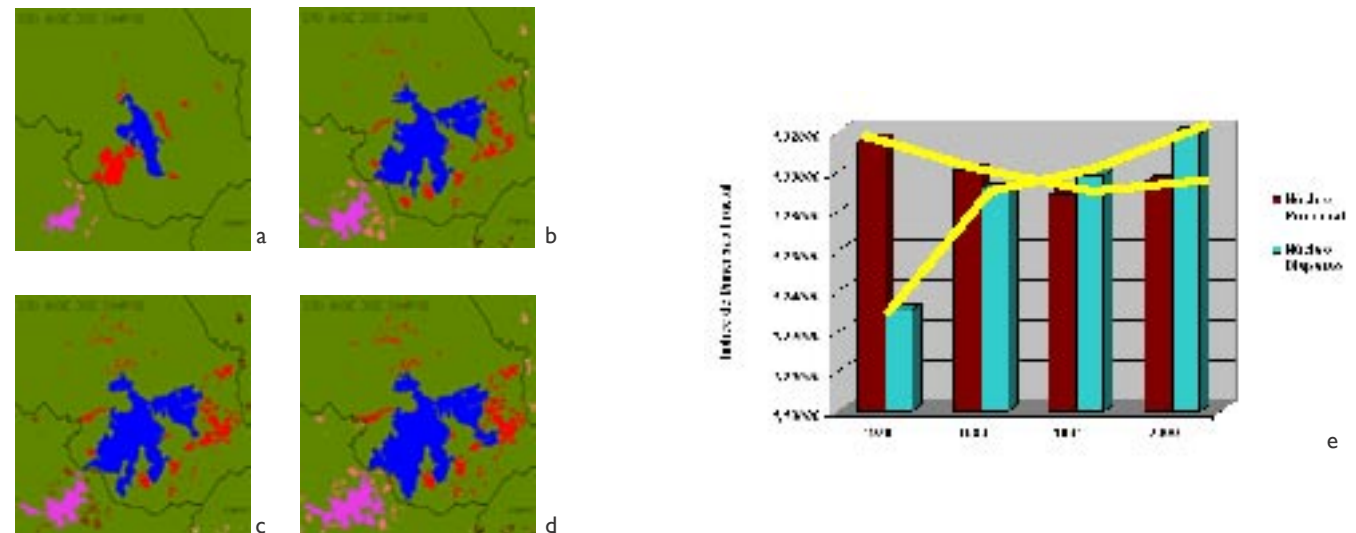


Figura 14 – Evolução da mancha urbana em São José dos Campos e Jacareí, em a. 1970; b. 1980; c. 1990; d. 2000; e. Gráfico da evolução do índice de dimensão fractal para os núcleos principal e dispersos de São José dos Campos. Fonte: Pereira et al. (2006); Almeida et al. (2007).

manchas ou fragmentos urbanos. O gráfico mostra que as manchas urbanas dispersas, em cor verde, aumentam em complexidade, uma vez que novos loteamentos são adicionados quase que arbitrariamente (*i.e.*, sem um padrão especial definido) às manchas urbanas destacadas, ao passo que as principais aglomerações urbanas (em cor magenta) tiveram um ligeiro decréscimo no índice de dimensão fractal, *i.e.*, vazios urbanos nas franjas dessas aglomerações tendem a ser ocupados com o passar do tempo, reduzindo sua complexidade geométrica.

3.7 Microclima e qualidade de vida urbana

Microclima e qualidade de vida urbana têm se tornado temas cada vez mais presentes no escopo do sensoriamento remoto urbano nos últimos anos. Fuckner *et al.* (2009) identificaram ilhas de calor urbanas nas áreas centrais de São Paulo e Rio de Janeiro, aplicando transformações radiométricas nas bandas termais do sensor ASTER/Terra, e produziram mapas de temperatura de superfície. Eles foram então sobrepostos (Figura 15) a modelos digitais de elevação do mesmo sensor (o ASTER), e, junta-

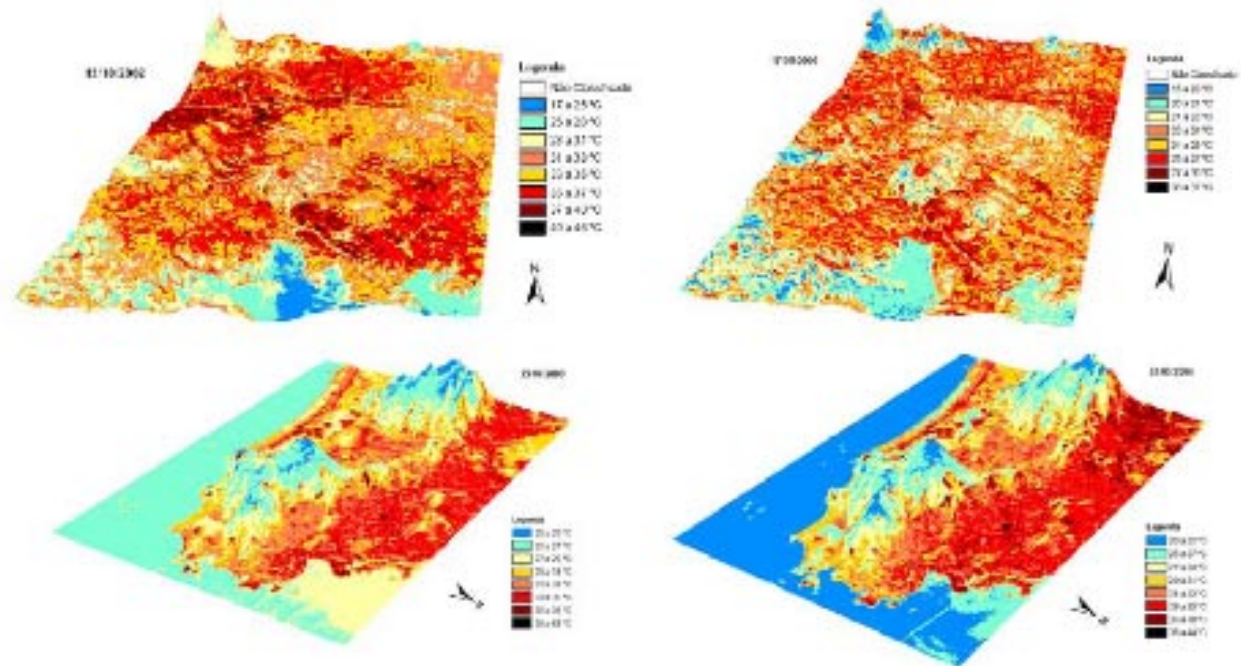


Figura 15 – Mapas de temperatura de superfície sobrepostos a modelos digitais de elevação. Fonte: Fuckner *et al.* (2009).

mente com outros dados derivados de satélite, permitiram determinar as relações entre topografia, vegetação, cobertura do solo e temperatura de superfície.

3.8 Desastres naturais e vulnerabilidade ambiental

Pela primeira vez em sua história, a costa sul brasileira foi atingida por um furacão, no ano de 2004 – o Catarina –, fato que é atribuído às atuais mudanças ambientais globais.

Centenas de pontos de GPS (equipamentos de posicionamento global que fornecem coordenadas x,y segundo um *datum* e um sistema de projeção cartográfica) foram coletados em campo, levantando a intensidade dos danos nas áreas afetadas. Esses dados foram posteriormente processados com o método de interpolação espacial por *krigagem* ordinária, gerando um mapa de superfície contínua da intensidade dos danos. Esse mapa foi então entregue às autoridades locais e a defesa civil, para subsidiar o planejamento de estratégias a serem adotadas em eventos futuros de igual magnitude, bem como servir de medida de precaução para priorizar ações de alerta, evacuação e resgate nas áreas mais vulneráveis.

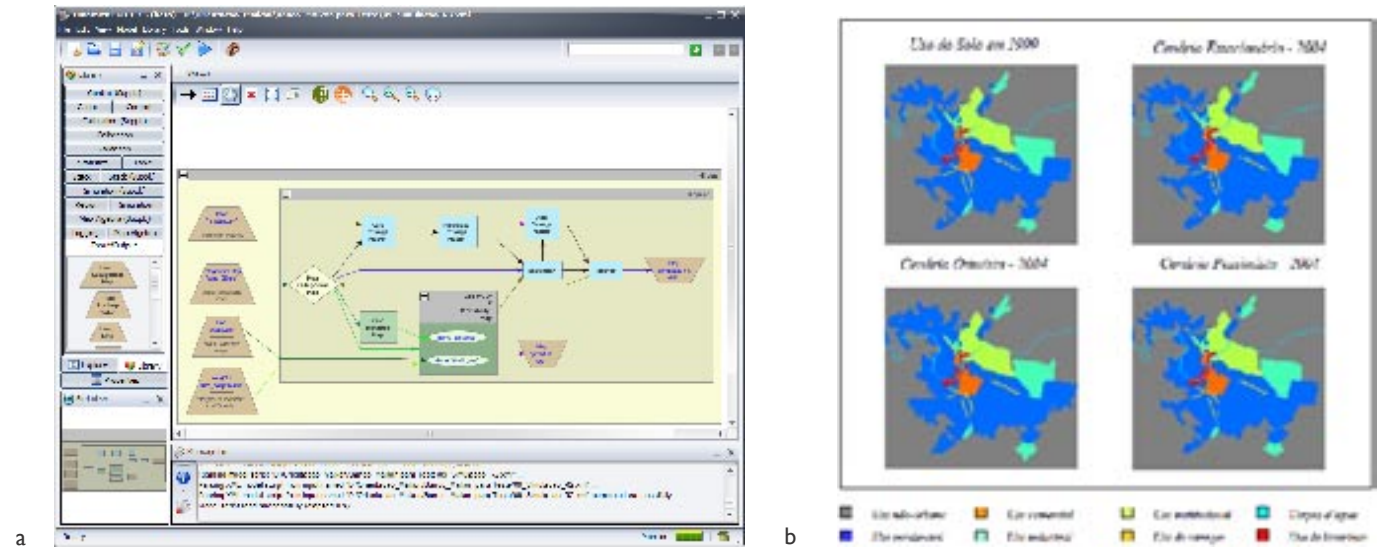
3.9 Modelagem dinâmica espacial de uso do solo urbano

Modelagem dinâmica espacial é um tema importante em sensoriamento remoto urbano e destina-se a simular, em ambiente computacional, fenômenos dinâmicos espaciais que ocorrem no meio urbano. Mudanças de uso do solo, dinâmica de tráfego, fluxo de pedestres, enchentes, dispersão de poluentes atmosféricos, praticamente qualquer forma de fenômeno dinâmico observado em áreas urbanas pode ser modelada por meio de modelos estatísticos e plataformas computacionais específicas, alimentadas por mapas digitais de cidades, elaborados e/ou refinados por imagens de satélite.

A Figura 16a ilustra a interface gráfica de uma plataforma de modelagem de domínio público (gratuita) “Dinamica EGO”, desenvolvida pela UFMG. A plataforma é aberta a diferentes métodos de parametrização, como bayesiano, redes neurais artificiais, regressão linear e logística, algoritmos genéticos e outros. Sua interface gráfica é baseada em diagrama de fluxos, que encapsulam rotinas de C++ para

a parametrização, calibração e validação. A Figura 16b apresenta o uso real em 1999 e cenários de simulações de mudanças do uso do solo em Piracicaba (SP), no ano de 2004.

Figura 16 – a. Interface gráfica da plataforma de modelagem Dinâmica EGO. b. Uso real em 1999 e cenários de mudança do uso do solo em Piracicaba (SP) em 2004. Fonte: Rodrigues et al. (2007); Almeida (2003).



3.10 Epidemiologia e saúde pública em áreas urbanas

Epidemiologia e saúde pública em cidades ganharam grande atenção em sensoriamento remoto urbano nos últimos tempos. Um trabalho digno de menção foi o desenvolvido em parceria pela Unicamp e a UFMG para controlar a dengue. Armadilhas para a captura de mosquitos foram distribuídas em cidades-teste que apresentavam um grande número de casos. As fêmeas são atraídas por feromônios, colocados nas armadilhas. Uma vez que a fêmea é capturada, ela adere a uma cola especial e não consegue mais escapar da armadilha. O número de fêmeas capturadas é diariamente registrado por meio de equipamentos de GPS ou *palm top* e é continuamente inserido em um banco de dados geográficos, sendo esses dados posteriormente processados por meio de ferramentas de análise espacial, gerando assim mapas das áreas de risco. Esses mapas são submetidos à apreciação das autoridades competentes de vigilância epidemiológica, para que determinem as devidas ações no combate e controle da propagação da doença por meio de campanhas públicas de esclarecimento.

3.11 Ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas para aplicações urbanas e regionais

Plataformas de SIG têm sido especialmente customizadas para autoridades municipais de governo, visando à gestão do desenvolvimento territorial. Uma delas, a SIGMUN¹, foi particularmente concebida para o controle de sonegação de tributos territoriais na cidade costeira de São Sebastião (SP), na qual os moradores normalmente constroem as piscinas após o término da obra da residência, não regularizando essa situação perante a prefeitura. Uma vez que piscinas constituem área construída tributável, esta plataforma é continuamente alimentada por um banco atualizado de ortofotos da área urbanizada, ajudando o poder local no combate à sonegação de imposto territorial urbano (IPTU).

¹ A plataforma SIGMUN foi desenvolvida pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Inpe.

4. Considerações finais

Para um gerenciamento mais eficiente das áreas urbanas, despontam, na transição do milênio, as tecnologias de sensoriamento remoto e aerofotogrametria digital. É válido salientar as distinções entre ambas, porque cada uma delas apresenta sua especificidade. O sensoriamento remoto orbital oferece visão sinóptica, ao passo que as aerofotos proveem uma visão mais pormenorizada do ambiente urbano.

As imagens de satélite oferecem repetitividade de recobrimento, o que é crucial para o monitoramento de caráter sistemático, enquanto as aerofotos são executadas sob demanda. O custo, quando comparado em termos de repetitividade de recobrimento, considerando o fato de que hoje muitas imagens de satélites encontram-se disponíveis *on line*, é comparativamente inferior. É importante esclarecer que o sensoriamento remoto orbital presta-se a estudos regionais.

Alguns mitos sobre imagens de satélites, que insistem na crença de que elas podem solucionar todos os problemas de mapeamento e levantamento de informações no nível intraurbano, principalmente no que se refere a cadastros urbanos, devem ser eliminados. Nem as imagens do QuickBird, com resolução de 67 cm, conseguem fornecer informações confiáveis para fins

de cadastro urbano. Haverá uma nova geração de satélites QuickBird com resolução de 25 cm, porém, como essas imagens ainda não estão disponíveis, nada se pode afirmar sobre elas. No momento atual, no entanto, não podemos prescindir das aerofotos para fins de estudos urbanos mais detalhados.

Em termos conclusivos, podemos afirmar que as mudanças nas tecnologias de informação e telecomunicações, associadas a uma velocidade no fluxo de informações sem precedentes em um mundo cada vez mais globalizado, levam-nos a reconhecer o papel crucial das geotecnologias para o planejamento e gestão urbana e regional, bem como a conjecturar como tendências futuras plausíveis em sensoriamento remoto urbano: i) o uso de tecnologias de ponta em fusão de dados de diferentes sensores e de ferramentas avançadas de análise espacial; ii) o emprego de modelos tridimensionais dinâmicos integrados (que acoplem, por exemplo, modelos de mudanças de cobertura e uso da terra a modelos climáticos); iii) assim como a utilização de realidade virtual no planejamento participativo; iv) o uso de dados de sensoriamento com maiores resoluções espacial, temporal e radiométrica; v) a inclusão do uso de veículos aéreos não tripulados para o monitoramento rotineiro de ambientes urbanos; vi) além da existência de sistemas cada vez mais sofisticados de análise orientada a objeto e abordagens cognitivas para a interpretação automática de imagens digitais.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, C. M. *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento*. 323 p. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2003 [INPE-10567-TDI/942/A].

ALMEIDA, C. M.; ALVES, C. D.; PEREIRA, M. N.; MIGLIORANZA, E.; TOMÁS, L. R. Morphological Metrics and Unsupervised Neural Networks to Analyse Urban Sprawl and Intercity Commuting. Trabalho apresentado no XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. In: *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007, p. 5059-66.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M.V.; CAMARA, G.; PAIVA, J. A. C.; ANGELIS, C. F. Técnicas inferenciais aplicadas ao estudo de adequabilidade de sítio: o caso da implantação de terminais intermodais ao longo do Piracicaba navegável. Trabalho apresentado no X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2001, Foz do Iguaçu (PR). In: *Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001, p. 887-94.

ALMEIDA, C. M.; SOUZA, I. M. E.; ALVES, C. D.; PINHO, C. M. D.; FEITOSA, R. Q. Métodos cognitivos de classificação aplicados a imagens QuickBird para a detecção de áreas residenciais homogêneas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 61, 2009a, p. 1-12.

ALMEIDA, C. M.; OLIVEIRA, C. G.; RENNÓ, C. D.; FEITOSA, R. Q. *Object-Based Image Analysis and 3D Urban Modeling to Support Studies of Informal Settlements*. Trabalho apresentado na Mesa Redonda “Abordagens Recentes em Sensoriamento Remoto de Áreas Urbanas”, no XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal (RN). São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009b. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2009/pdf/w_claudia_almeida_urbano.pdf>.

AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M.; CÂMARA, G.; QUINTANILHA, J. A. DMSP/OLS Night-Time Light Imagery and Urban Population Estimates in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 5, 2006, p. 855-70.

FUCKNER, M. A.; MORAES, E. C.; FLORENZANO, T. G. Processamento de dados multiespectrais termais aplicado à análise espaço-temporal dos padrões de temperatura da superfície nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Natal (RN). In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais 2009, p. 1369-76.

GENOVEZ, P. C. *Território e desigualdades: análise espacial intra-urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos (SP)*. 220 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2002 [INPE-12177-TDI/973].

INSTITUTO TOLEDO DE ENSINO (ITE). Faculdade de Ciências Econômicas de Bauru. *Bauru – dimensões da cidade centenária*. Uma radiografia sócio-econômico-cultural. Bauru: ITE, 1998. 205 p. [Data ITE].

MACHADO e SILVA, A. *Sensores de alta resolução espacial*. Trabalho apresentado à disciplina de Sistemas e Sensores Avançados para Observação da Terra. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

PEREIRA, M. N.; GONÇALVES, C. D. A. B.; SOUZA, I. M. E.; GARCIA, S.; PORTELA, A. G.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G. Uso de imagens de satélite como subsídio ao estudo do processo de urbanização. *Revista de Estudos sobre Urbanização, Arquitetura e Preservação*, v. 46, 2006, p. 6-33.

RAMOS, F. R. *Análise espacial de estruturas intra-urbanas: o caso de São Paulo*. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2002 [INPE-10286-TDI/905].

REIS, N. G. *Notas sobre urbanização dispersa e novas formas de tecido urbano*. São Paulo: Via das Artes, 2006, 201 p.

RODRIGUES, H. O.; SOARES FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. Trabalho apresentado no XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis (SC). In: *Anais*

do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007, p. 3089-96.

SLATER, P. N. Remote Sensing, Optics and Optical Systems. Boston (MA): Addison-Wesley Pub. Co., 1980, 575 p.