

oficina & texto

# SENSORIAMENTO REMOTO E SIG AVANÇADOS

novos sistemas sensores  
métodos inovadores

versão brasileira atualizada e organizada por

**Thomas Blaschke e Hermann Kux**

**SENSORIAMENTO  
REMOTO E SIG  
AVANÇADOS**  
novos sistemas sensores  
métodos inovadores

2ª edição



**SENSORIAMENTO  
REMOTO E SIG  
AVANÇADOS**  
novos sistemas sensores  
métodos inovadores

2ª edição

nova versão atualizada e organizada por  
Thomas Blaschke e Hermann Kux

Tradução: Hermann Kux

**oficina de textos**

Copyright original ©2002 by Herbert Wichmann Publishers, Alemanha  
Copyright da tradução em português ©2007 Oficina de Textos  
1ª reimpressão 2009

Capa: Malu Vallim

Imagem capa: Ikonos - 1m em cor

Rio de Janeiro - RJ

Imagem coletada no dia 28 de fevereiro de 2000

Projeto gráfico e diagramação: Anselmo T. Ávila

Assistência editorial: Ana Paula Ribeiro

Preparação: Rachel Kopit Cunha

Revisão: Oficina de Textos

Tradução: Hermann Kux

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Sensoriamento remoto e SIG avançados : novos sistemas sensores : métodos inovadores / versão brasileira atualizada e organizada por Thomas Blaschke e Hermann Kux ; tradução Herman Kux. — 2ª ed. — São Paulo : Oficina de Textos, 2007.

Título original: Fernerkundung und GIS

Bibliografia.

ISBN 978-85-86238-57-4

1. Satélites artificiais em sensoriamento remoto 2. Sensoriamento remoto  
3. Sensoriamento remoto - Imagens 4. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)  
I. Blaschke, Thomas. II. Kux, Hermann.

07-1866

CDD-621.3678

Índices para catálogo sistemático:

1. Sensoriamento remoto e SIG : Tecnologia  
621.3678

Todos os direitos reservados à

**Oficina de Textos**

Travessa Dr. Luiz Ribeiro de Mendonça, 4

01420-040 São Paulo SP Brasil

Fone: (11) 3085-7933 Fax: (11) 3083-0849

site: [www.ofitexto.com.br](http://www.ofitexto.com.br) e-mail: [ofitexto@ofitexto.com.br](mailto:ofitexto@ofitexto.com.br)

## Prefácio da 1ª edição

Este livro se baseia em uma publicação em alemão. Trata-se, não obstante, de mais do que uma tradução: é uma versão ampliada e atualizada, e adaptada às condições do mercado latino-americano.

Por um lado é aparente que o desenvolvimento técnico foi bastante rápido. Isso foi antevisto ao serem considerados os sistemas sensores. Por outro lado, no que se refere ao processamento de imagens, observa-se um tipo de mudança de paradigma. Em função das resoluções espaciais continuamente melhores, são necessárias novas estratégias para o processamento de dados. Nesse contexto, uma forte tendência direciona-se para o "processamento baseado em objetos". Essa tendência é um dos principais focos deste livro. É interessante notar que esse novo desenvolvimento – como talvez era de se esperar – não ocorreu a partir da América do Norte, mas da Europa. O *boom* de aplicações, que não colocam o *pixel* no primeiro plano, porém, os objetos derivados do *pixel*, é comprovado atualmente por várias centenas de publicações a respeito. Com um certo atraso, esse desenvolvimento também está ocorrendo nos manuais de sensoriamento remoto. Em sua última edição (2005), John Jensen dedica a essa concepção um capítulo adicional. Atualmente, existem tão-somente poucos pacotes de software, que permitem manusear apropriadamente as resoluções extremamente elevadas e os enormes volumes de dados. O mercado, porém, não vai ficar em compasso de espera. A par das aplicações estão aparecendo novos campos. Elevadas resoluções espaciais e temporais, ou seja, de taxas de repetição de imageamento, são quase que complementares. Segundo fornecedores comerciais da "geração de 1 metro" dos sensores orbitais estão mostrando, ambas as opções de resolução são possíveis, mas com elevados custos e na dependência de condições meteorológicas favoráveis (nuvens) e de acontecimentos políticos. Com relação a esses acontecimentos, cumpre lembrar que durante as guerras no Afeganistão e Iraque, em alguns pontos do Planeta, tornou-se difícil obter dados de satélite: os militares tinham absoluta prerrogativa. Somente a disponibilidade de dados de alta resolução não é uma garantia de resultados melhores. Em um futuro próximo, teremos que conviver com combinações de dados multiescala e multissensor.

Este livro é bastante crítico. Enquanto muitas publicações próximas à indústria louvam a viabilidade técnica, aqui são feitos também questionamentos quanto à plausibilidade, e aos limites da tecnologia. Antes de tudo, fica claro que sensoriamento remoto não pode ser um mero "clique em teclas". Uma avaliação científica exige procedimentos baseados em hipóteses. Especialmente quando identificamos objetos em imagens, precisa-se escolher, explicitamente, uma ou várias escalas finais de trabalho. Porquanto, há alguns anos, valia a máxima "extraia dos dados tudo o que você conseguir", este não pode ser o objetivo em uma complexa cena urbana/suburbana com alta resolução. Aqui precisarão ser tomadas decisões se árvores isoladas e arbustos devem ser reunidos ou se devem ser classificados como objetos ricos em detalhes, que são identificáveis, como, por exemplo, automóveis. Às vezes, essa riqueza de detalhes perturba a cena, porque os automóveis complicam a classificação entre estacionamentos, ruas e telhados de casas. Por outro lado, para muitas aplicações, a riqueza de detalhes constitui uma felicidade, se eles forem considerados corretamente. Este é, aliás, um problema fundamental da futura sociedade de informação: o manuseio e a utilização adequados de conjuntos de dados muito grandes. Para tanto, os conjuntos

de geodados e SIGs existentes podem fornecer uma grande contribuição. Por intermédio da conexão desses ambientes, muito separados no passado, as relações temporais, espaciais, temáticas e escalares tornam-se variáveis. As técnicas para a detecção, distribuição e utilização interdisciplinar de geodados possuem, por isso, um caráter genérico. A compreensão de dados como produto, que é fornecido em um ambiente interdisciplinar em forma adequada para o seu reuso e que se orienta nas necessidades do "cliente", é a chave para o trabalho interdisciplinar, mas também para a transferência de conhecimentos para a aplicação.

Talvez foi a visão dessa conexão entre Sensoriamento Remoto e SIG que animou o meu parceiro Dr. Hermann Kux a tomar o livro em alemão e continuar a desenvolvê-lo. O mercado na América do Sul e Central parece maduro para isto: já faz tempo que a transferência de tecnologia não é uma via de sentido único, e os desenvolvimentos próprios nos últimos anos foram impressionantes. O nível dos simpósios brasileiros de SIG e Sensoriamento Remoto é elevado, como estou convencido desde o XII SBSR. Infelizmente, até as apresentações em português ficam "no escuro" para mim, mesmo quando uso o meu latim de escola, consigo entender  *grosso modo* os conteúdos dos títulos e resumos. Como se faz isto, sem desistir de seu próprio idioma e somente publicar em inglês – quer se aceite ou não é a língua franca da ciência atual – estou procurando soluções também no espaço da língua alemã.

A construção de infra-estruturas de geodados é um tema atual, cuja importância vem aumentando na política, economia e ciência. Geoinformações com relacionamento areolar bem definido baseiam-se em dados de observação da Terra (sensoriamento remoto, dados de satélite), dados ambientais, mapas topográficos e temáticos, bem como dados sobre condições físicas e químicas da Geo, Hidro, Crio e Atmosfera. Cada vez mais, os compromissos internacionais (Protocolo de Kioto, parâmetros de desenvolvimento sustentável da OECD) só se tornam possíveis por meio de contínuas atualizações de dados SIG, de dados de sensoriamento remoto. Isto é reconhecido, bem como cada vez mais programas internacionais baseiam-se, conseqüentemente, em dados de sensoriamento remoto e SIG, como, por exemplo, as iniciativas internacionais GEO (Group of Earth Observation), GTOS (Global Terrestrial Observation System), FAO ou GOF-C-GOLD (Global Observation for Forest and Land Cover Dynamic). Estes desenvolvimentos são recentes e valeria a pena detalhá-los mais. Eles mostram que o sensoriamento remoto ultrapassou a sua "infância", tornando-se uma ciência séria, com métodos próprios que superam as leis físicas do retroespalhamento.

Março de 2005

Thomas Blaschke

## Prefácio da 2ª edição

A primeira edição deste livro teve um sucesso tal que, mais rápido do que o esperado, aconteceu a segunda edição. Normalmente, em edições seguidas uma da outra, há somente pequenas correções; neste caso, reagimos às necessidades do mercado brasileiro. Os capítulos idênticos à primeira edição foram somente um pouco retrabalhados e, quando pertinente, atualizados. A alteração mais importante foi a introdução de mais cinco capítulos de autores brasileiros. Assim, o livro afastou-se um pouco mais do original em alemão, publicado em 2002, ultrapassando-o em termos de atualização. A nova edição mostra também a forte posição do Brasil na área de sensoriamento remoto: não somente o internacionalmente conhecido Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), mas também universidades-líderes estão pesquisando neste campo extremamente atual. As cinco novas contribuições provêm de autores do Inpe, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, da Universidade de São Paulo/Escola Politécnica e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Conseqüentemente, o livro tornou-se não só mais volumoso, mas também mais atualizado, vindo ao encontro das exigências do mercado latino-americano. A mudança de paradigma, mencionada no prefácio da primeira edição é cada vez mais perceptível. Ao tema "processamento digital baseado/orientado em objetos" são dedicadas todas as cinco novas contribuições brasileiras. Esses trabalhos têm em comum o fato de que todos os autores trabalham com imagens de alta resolução espacial e principalmente em áreas urbanas e periferias urbanas com rápidas mudanças. Inicialmente, isso pode parecer curioso para um observador estrangeiro que associa o Brasil à floresta amazônica. Para um especialista em sensoriamento remoto, porém, fica claro que os dados de satélite com resolução espacial inferior e os "tradicionais" procedimentos de interpretação – assumindo que se possa falar de "tradição" em uma história de vida de aproximadamente 35 anos do sensoriamento remoto – que incluem aquelas imagens com "resolução intermediária", na faixa de 30 a 500 metros, são indispensáveis para o monitoramento de grandes regiões. Para tais aplicações, pode-se, no entanto, assumir que as metodologias de utilidade comprovada satisfazem plenamente as exigências. No caso de sistemas sensores de alta resolução, no entanto, há uma demanda por novos procedimentos conduzidos com uma boa base teórica para o manuseio inteligente do enorme volume de dados.

Conforme consta no prefácio da primeira edição, fica claro que o sensoriamento remoto está cada vez mais estabelecido, tornando-se uma ciência com um arcabouço metodológico próprio. Uma olhada na dinâmica e mundialmente conhecida enciclopédia online *Wikipedia* mostra, por exemplo, que o item *Object-based image analysis* tem um significado próprio (disponível em: <http://wikipedia.org/wiki/Obia>). Quase mais surpreendente nesta segunda edição é o fato de que esse campo não é dominado pelo mercado americano. Por um lado, deve ser dado o crédito ao idioma inglês na ciência, em função das publicações correspondentes; os desenvolvimentos originais, porém, provêm de outros idiomas. Além do idioma alemão, deve ser mencionado aqui também os idiomas português e espanhol. Durante este semestre, como professor-visitante na Universidade da Califórnia, isso fica mais nítido para mim.



Agradeço novamente o engajamento do Dr. Kux pelo cuidado com esta segunda edição e também à Sra. Signer e à editora Oficina de Textos. A editora Wichmann generosamente desistiu da cobrança de taxas de *copyright* sobre o original em idioma alemão e assim contribuiu fortemente para esta publicação e para que um livro científico como este possa sair por um preço módico. Desejo expressar os meus agradecimentos aos patrocinadores (*IAI – Inter-American Institute e Space Imaging*), especialmente pela bela imagem do Rio de Janeiro na capa.

Long Beach, EUA, 20 de setembro de 2006.

Thomas Blaschke

## Sumário

1	BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C. e LANG, S.: Processamento de Imagens num Ambiente Integrado SIG / Sensoriamento Remoto – Tendências e Conseqüências ....	11
	<b>Fundamentos, exigências e relacionamento com a teoria</b>	
2	EHLERS, M.: Sensoriamento Remoto para Usuários de SIG – Sistemas Sensores e Métodos: entre as Exigências do Usuário e a Realidade .....	19
3	LANG, S.: A Utilização do Conceito de Totalidade (Holismo) na Geração de Planos de Segmentação Regionalizados em Conjuntos de Imagens de Altíssima Resolução .....	39
4	KOK, R. de; BUCK, A.; SCHNEIDER, T. e AMMER, U.: Design de Projeto Modular na Análise Orientada a Objetos .....	47
5	SCHIEWE, J. e TUFTE, L.: O Potencial de Procedimentos Baseados em Regiões para a Avaliação Integrada de Dados de SIG e Sensoriamento Remoto .....	56
	<b>Novos sistemas sensores e novos métodos</b>	
6	FRAUENDORF, J.; GLÄSSER, C.; ÖLBERT, C. e FISCHER, J.: Monitoramento Hiperespectral de Lagoas de Resíduos de Mineração de Linhita a Céu Aberto com Métodos Inovadores .....	66
7	ZHANG, C. e BALTSAVIAS, E.: Melhoria e Atualização de uma Base de Dados Rodoviários por Meio de Técnicas de Análise de Imagens, Usando Múltiplas Fontes de Conhecimento e Índícios .....	76
8	LESER, C.: Mapeamento Operacional de Tipos de Biótopos com Dados do HRSC – Problemas e Concepções de Solução .....	89
9	JANOTH, J.; EISL, M.; KLAUSHOFER, F. e LUCKEL, W.: Procedimentos Baseados em Segmentação para a Análise de Mudanças e Classificação Florestais com Dados de Satélite de Alta Resolução .....	99
10	NEUBERT, M. e MEINEL, G.: Análise de Dados do Satélite Ikonos Baseada em Segmentação – Utilização do Software de Análise de Dados eCognition para Diferentes Áreas-Testes .....	108
11	REICHEL, L.; NOACK, W.; KNÖPFLE, W. e LEHMANN, E.: Modelos Altimétricos ERS-TanDEM de Resolução Média e Dados de Alta Resolução Digitais em Estereoscopia da Câmara HRSC e sua Aplicação Comercial .....	118
12	FEITOSA, R. Q.; COSTA, G. A. O. P.; CAZES, T. B. e FEIJÓ, B.: Ajuste Automático de Parâmetros de Segmentação .....	129
	<b>Aplicações e integração de SIG e sensoriamento remoto</b>	
13	LEUKERT, K.: Utilização de Dados de SIG para a Obtenção de Objetos .....	145
14	MÖLLER, M.; ROSENBERG, M. e VOLK, M.: Utilização de Métodos do Sensoriamento Remoto e SIG para a Caracterização de Ambientes: uma Contribuição à Implementação das Diretrizes de Água da União Européia .....	153

15	PILZ, H. e STROBL, J.: Análise de Impermeabilização com Base em Ortofotografias Aéreas Coloridas Digitais Através de Processamento de Imagens Orientadas a Objetos .....	162
16	BAATZ, M. e MIMLER, M.: Objetos de Imagem Iniciais como Suporte para a Extração de Objetos de Interesse .....	172
17	REDER, J.: Desenvolvimento de um Procedimento Semi-automático para a Detecção de Novas Áreas de Ocupação Humana, por Meio de Pesquisas Comparativas de Dados de Satélite de Alta Resolução para o Planejamento Urbano e Regional .....	180
18	ANTUNES, A. F. B. e CENTENO, J. A. S.: Aplicação de Dados Sensores Remotos de Alta Resolução em Zonas Urbanas .....	189
19	PINHO, C. M. D. de; KUX, H. J. H. e ALMEIDA, C. M.: Influência de Diferentes Padrões de Ocupação do Solo Urbano na Qualidade de Mapeamentos de Cobertura do Solo em Imagens de Alta Resolução Espacial: Estudo de Caso São José dos Campos (SP) .....	198
20	ARAÚJO, E. H. G.; KUX, H. J. H. e FLORENZANO, T. G.: Análise Multitemporal de Dois Bairros de Belo Horizonte (MG) Usando Classificação Orientada a Objetos de Imagens <i>Quickbird</i> e Inferências Espaciais .....	209
<b>Soluções operacionais inovadoras para tarefas de monitoramento</b>		
21	MÖLLER, M.: Estudos de Qualidade e Aplicações Práticas de Dados de Scanner com Altíssima Resolução .....	227
22	ANDRESEN, T.; MOTT, C.; SCHÜPFERLING, R.; ZIMMERMANN, S. e SCHNEIDER, T.: Análise Orientada a Objetos de Dados de Sensoriamento Remoto para a Obtenção de Parâmetros Aquáticos/Terrestres .....	241
23	GÄHLER, M.; JANOWSKY, R. e SCHRÖDER, U.: Classificação Automática de Biótopos Baseada em Dados de Scanner Aerotransportado de Altíssima Resolução .....	251
24	FICHTELMANN, B.; BORG, E.; GÜNTHER, A.; DAMEROW, H.; GUDER, H.-G.; BROCKMANN, C.; WOLFE, E.; REIMER, R. e BARUTH, B.: Automação de SR com Base num Exemplo de Monitoramento Operacional de Clorofila no Mar Báltico .....	259
25	PINHEIRO, E. S. e KUX, H. J. H.: Imagens <i>Quickbird</i> Aplicadas ao Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata .....	269
26	NÓBREGA, R. A. A.; QUINTANILHA, J. A. e O'HARA, C. G.: Detecção de Arruamentos em Áreas de Ocupação Urbana Irregular com Imagens do Satélite <i>Ikonos-2</i> .....	288
	Índice dos Autores .....	300

## Processamento de Imagens num Ambiente Integrado SIG / Sensoriamento Remoto - Tendências e Conseqüências

Thomas Blaschke, Cornelia Glässer e Stefan Lang

### Resumo e Contexto

Este livro é o resultado de um *Workshop* sobre o tema "SIG e Sensoriamento Remoto – Novos Sensores e Métodos Inovadores" que aconteceu em julho de 2001 na Universidade de Salzburg (Áustria) em paralelo com a AGIT 2001, ou seja a Reunião Anual do Grupo de Trabalho Interpretação de Dados de Sensoriamento Remoto da Sociedade Alemã de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (DGPF). Ao invés de descrever esse evento e de fazer uma discussão das outras 26 contribuições que compõem este volume, pretendemos aqui resumir, da forma mais compacta possível, algumas tendências e resultados desse evento, que também foi inovador na forma de apresentação. Resumindo, colocamos dois temas no centro de nossa atenção que refletem o título do *Workshop* e do presente livro. O primeiro tema não é novo nem pode ser claramente delimitado. Apesar de diversos reveses devidos a falhas no lançamento de satélites, a indústria forneceu sensores com resolução aprimorada, satisfazendo assim às exigências que os usuários vinham fazendo há muitos anos. O segundo tema diz respeito à tendência prevista por poucos anteriormente: com a alta resolução onde um *pixel* não é mais automaticamente maior/igual aos objetos pesquisados, subitamente não são procurados somente desenvolvimentos contínuos de métodos de classificação, porém novas concepções metodológicas. Em parte o usuário é surpreendido não somente pela quantidade de dados, mas também pelo grau de detalhe das informações. Este último aspecto exige novos caminhos para a regionalização da informação, abstração conduzida pela teoria e o relacionamento de *pixels* individuais com construções lógicas. Do lado da aplicação prática, neste volume parece haver um grande número de procedimentos metodológicos que usam as técnicas de segmentação. Isso corresponde à situação atual do mercado e ser um dos motivos pelos quais os fornecedores líderes do mercado de software para o processamento de imagens de satélite (ERDAS e PCI) fizeram contratos de revenda com o atualmente único fornecedor de software de processamento de imagens orientado a objetos (Definiens AG, Alemanha).

Assumindo que na nossa sociedade o mercado tem sempre razão, um sucesso comercial não pode constituir um critério científico decisivo, na avaliação "correta" ou "corretamente direcionada" de um novo desenvolvimento. Os cientistas que trabalham na agregação de valor à informação bruta dos dados de satélite são exortados a desenvolver uma metodologia de análise de imagens abrangente, baseada em conhecimento e "inteligente" no lugar de soluções técnicas. Este livro deve constituir a maior contribuição da comunidade, predominantemente de língua alemã, a esse desenvolvimento. Uma parte pequena das contribuições do

*Workshop* mencionado foi redigida em inglês, e publicada no periódico *GIS – Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, volume 6/01 (2001) e pretende divulgar, no exterior, um número muito grande de desenvolvedores e usuários, de língua alemã, atuantes na área. Eventualmente assistimos aqui a uma tendência que poderá levar em “outra direção” sobre o Atlântico e que resulte num tipo de mudança de paradigma – desde que o sensoriamento remoto seja considerado como uma ciência, o que no entanto não cabe discutir aqui.

### 1.1 Situação Inicial

SIG e Sensoriamento remoto estão cada vez mais amalgamados. A velocidade e a dinâmica dessa interpenetração de dois universos, antes essencialmente separados, aumentou consideravelmente nos últimos anos. Para tanto, a integração cada vez mais intensa de dados de sensoriamento remoto e SIG num ambiente de mesa (*Desktop*) desempenhou um importante papel. O desenvolvimento mais atual iniciado é a rápida mudança de processamento de imagens, até então orientado fortemente, do ponto de vista metodológico, ao *pixel* como o menor elemento e portador exclusivo de informações. Este capítulo apresenta as conseqüências desse desenvolvimento para os atuais e futuros usuários de SIG e sensoriamento remoto, com ênfase em estudos do meio ambiente.

Os conflitos de uso da terra aumentam constantemente na prática do planejamento cotidiano. As exigências quanto ao planejamento espacial, proteção e monitoramento do meio ambiente, também aumentam constantemente. Dados básicos para o planejamento, ou seja informações sobre as condições atuais precisam estar atualizadas e disponíveis, na medida do possível, com boa resolução. As rápidas mudanças ambientais não podem mais ser registradas de modo a satisfazer às demandas crescentes, por meio do imageamento convencional. Isso significa que o mapa digital ou o conjunto de dados digitais de hoje, já está ultrapassado. Porém, para a tomada de decisões sustentáveis ou para o gerenciamento efetivo de conflitos, há necessidade de uma base de dados reconhecida por todos os participantes e que represente uma imagem da situação atual. Nos países industrializados, a preocupação maior é a distribuição do recurso limitado terra, no sentido espacial. Exemplos concretos, associados ao monitoramento ambiental, são o uso de superfícies da terra (no sentido de ocupação), impermeabilização de superfícies, recorte de superfícies. A água constitui um enorme problema no que se refere à contaminação das águas subterrâneas em áreas urbanas, enquanto no hemisfério sul, o acesso aos recursos naturais como áreas agricultáveis e água bem como a desertificação e o crescimento urbano descontrolado, serão os grandes desafios do séc. XXI. Em paralelo ao desenvolvimento técnico, essa demanda de dados atuais levará forçosamente os usuário de SIG, num futuro próximo, a uma utilização mais intensiva de dados de sensoriamento remoto. Esse desenvolvimento é caracterizado especialmente pelas quatro componentes representadas na Fig. 1.1.

### 1.2 Estado da Arte – Sistemas Sensores

Até recentemente, os dados do programa de satélite indiano IRS-1C/D eram considerados os de resolução espacial máxima (resolução no solo de 5,8 e 23 m para os modos pancromático e multiespectral, respectivamente), sendo um sistema operacional amplamente disponível. Ficou demonstrado em projetos que esses dados eram adequados, por exemplo, para o mapeamento

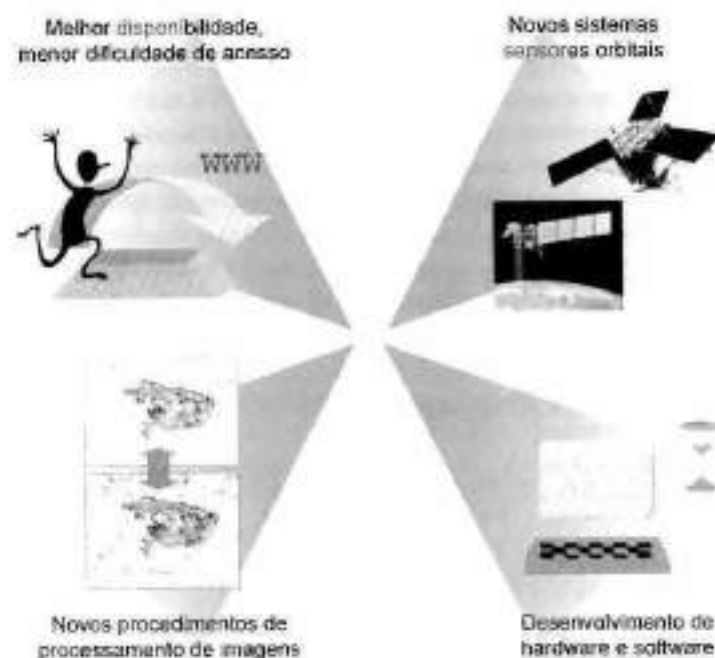


Fig. 1.1 *Tendências atuais no processamento de informações de sensoriamento remoto*

de estruturas de cidades e de biótopos, levantamentos de impermeabilização e para a atualização geral de dados até a escala de 1:25.000 (Meinel, 2000). Foram assim alcançadas – com algumas restrições – áreas que anteriormente estavam restritas às fotos aéreas, se não se levar em consideração as imagens do satélite russo com as câmaras ópticas KFA 1000 e KWR 3000, que não estão disponíveis regularmente.

Desde o início de 2000 são vendidas comercialmente as imagens do satélite americano Ikonos, cuja resolução espacial encontra-se na faixa de um metro no modo pancromático e quatro metros no modo multiespectral; em outubro de 2001, foi lançado com sucesso o QuickBird-2, após um rude golpe (Orbview 4) em setembro do mesmo ano. Para uma discussão mais detalhada dos sensores, sugerimos a leitura, neste volume, do capítulo de Ehlers.

As estratégias de processamento operacional, conteúdo informativo e adequação dos dados para questões de planejamento e especialmente para tarefas de monitoramento e gerenciamento não foram ainda pesquisadas para essa “nova geração” dos assim denominados satélites de resolução métrica (Ikonos, QuickBird e missões futuras), se bem que a indústria anuncia grandes perspectivas. Atualmente, problemas de disponibilidade ainda limitam uma utilização maciça, ou seja, a empresa que comercializa os dados do Ikonos não está dando conta, em parte, de pequenas encomendas de dados unitários. Além disso, muitas das taxas de repetição de dados são mais teóricas do que práticas, pois além das freqüentes programações concorrentes do sensor, precisam ser considerados os ângulos de incidência de imageamento, extremamente divergentes. De modo geral esses novos sensores, juntamente com as resoluções cada vez maiores das câmaras para fotografias aéreas digitais (mantendo a mesma altitude) levaram a um certo deslocamento dos conceitos de resolução. De repente Landsat e Spot são considerados como de “resolução média” e dados do scanner HRSCA

(*High Resolution Stereo Camera Airborne*) são considerados como de "resolução extremamente elevada" (vide os capítulos de Ehlers e Möller).

Em paralelo com a melhoria da resolução espacial, estão ocorrendo também grandes mudanças na faixa espectral. Enquanto vários programas de satélite favoreciam canais "de acordo com o Landsat", para assegurar a compatibilidade com os dados do satélite mais utilizado mundialmente, estamos assistindo atualmente a um grande desenvolvimento de sensores hiperespectrais. Sensores hiperespectrais aerotransportados como o CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), são usados com sucesso há muitos anos, porém raramente para imagear grandes superfícies. Mesmo quando não é utilizado todo o potencial da diferenciação do espectro eletromagnético e quando o usuário se satisfaz com 30 a 50 canais (larguras de banda do CASI são tipicamente p. ex. de 11 nm, vide capítulo de Frauendorf et al.), obtém-se, a uma altitude de vôo típica de 2.500 m, um *pixel* com tamanho de 3 x 3 m. As larguras das faixas imageadas são de aproximadamente 1,5 km, mas em altitudes maiores e correspondente resolução espacial mais reduzida, precisa-se de várias faixas de imageamento para uma área maior. Mosaicar posteriormente essa área freqüentemente não é trivial e o planejamento de uma campanha de imageamento desse tipo precisa satisfazer a certas exigências. Os esforços atuais para instalar sensores hiperespectrais em satélites levarão, sem dúvida, em médio prazo, a uma expansão maior do uso desses dados e um conjunto de usuários muito mais amplo irá trabalhar com "perfis espectrais".

Pesquisa e desenvolvimento estão diante do desafio de tornar acessível o volume crescente de imagens de satélite de alta resolução, a uma comunidade de usuários, cuja tarefa não é o processamento de imagens, mas o planejamento e o gerenciamento. A partir do grande número de objetos de uma imagem, deverão ser extraídos aqueles sobre os quais o usuário disponha de conhecimentos prévios e sobre cujas modificações (taxa de mudança, direção, valor) ele esteja procurando informações (p. ex. danos de granizo em áreas agrícolas, condição das florestas, enchentes etc). A exigência consiste em associar o conhecimento disponível para achar e avaliar os objetos bem como executar a classificação no sentido convencional com dados e atributos do objeto.

### 1.3 Conseqüências para a Análise de Imagens: a Demanda de Novos Procedimentos Num Ambiente Integrado de SIG/SR

Tal como apresentado inicialmente, um conjunto de problemas foi até agora freqüentemente desconsiderado: as elevadas resoluções exigem um novo tipo de processamento, que ultrapassa a observação de *pixels* unitários. No processamento digital de dados de sensoriamento remoto está ocorrendo uma grande revolução. Ao invés de classificar os *pixels* individualmente quanto às suas características espectrais, os novos procedimentos consideram a delimitação de objetos homogêneos como a base para o processamento posterior. São apresentados procedimentos que segmentam os dados de satélite e, a partir das características relevantes desses elementos em relação ao comportamento espectral, textura, forma e informação contextual, elaboram-se associações, por exemplo, com classes de uso do solo. Dessa forma, as desvantagens de uma concepção baseada em *pixels* ("efeito sal e pimenta"), Blaschke (2000a), são superadas e a funcionalidade do SIG ("delimita-se com", "encontra-se próximo a"... ) é integrada diretamente no processo de classificação. Procedimentos baseados em *pixels* são exclusivamente estatísticos e não utilizam a dimensão espacial da informação. Existem numerosas publicações

sobre os procedimentos usuais de classificação, como por exemplo Máxima Verossimilhança ou Distância Mínima. Os resultados obtidos são bons a muito bons, do ponto de vista estatístico, com exatidão variando de 85 a 90% sendo quase que corriqueiros atualmente. O problema principal é constituído ainda pelos chamados *pixels* mistos. Para alocá-los a classes existem as mais diferentes possibilidades, sendo das mais promissoras, os procedimentos de "desmistura espectral" (*spectral unmixing*), Ichoku e Karnieli (1996), por meio das "funções de pertinência final" (*endmembership functions*).

Vários artigos neste volume e em outros estudos alimentam a expectativa de que, com procedimentos orientados ao contexto e com precisão semelhante, possam ser obtidas formas "mais razoáveis" e próximas à realidade. Especialmente quando os resultados devem entrar para a área de planejamento e se forem introduzidos num sistema estadual de informações, é de extrema importância obterem-se formas próximas à realidade, Blaschke (2001), ao invés de "paisagens de *pixels*", Blaschke e Strobl (2001).

Destaca-se, especialmente para mapeamentos de uso do solo, um procedimento inovador da análise de imagens, cujo fundamento é o processamento de informação com base no objeto. O pacote de software eCognition da empresa Definiens AG (Alemanha) inclui, dentre outras, funções que consideram os parâmetros descritos, de informações da vizinhança. A classificação de estruturas de objetos nesse software, baseia-se num procedimento de lógica nebulosa (*fuzzy logic*), que permite amplas e complexas descrições de características. Por meio das "funções de pertinência" (*membership functions*) é possível formular regras, segundo as quais podem ser delimitadas classes de uso do solo. O potencial desse princípio é muito grande, Blaschke e Strobl (2001), Schiewe et al. (2001), e trabalhos empíricos vêm sendo apresentados cada vez mais – também neste volume – apoiando esta tese. Atualmente falta (ainda) uma fundamentada metodologia de processamento de imagens orientada a objeto. Os trabalhos de Lang e do grupo de autores Buck et al., apresentados adiante, são as primeiras contribuições metodológicas e ultrapassam as aplicações individuais nesse campo.

O aspecto central nos métodos de interpretação convencional *pixel a pixel* é que as relações de vizinhança entre os elementos de imagem podem ser consideradas, numa análise de imagem baseada em regiões, tanto na formação das regiões como também na posterior classificação. Resulta um amálgama funcional de operadores de SIG e métodos de classificação espectral, que não pode ser comparado, por exemplo, com a entrada de dados de SIG no treinamento de assinaturas ou na forma de máscaras e que leva a uma nova dimensão da integração. A explicação para o sucesso no mercado do software eCognition pode estar na aplicação consequente e simultânea de *kits* de construção regulares, de fácil manuseio, usando lógica nebulosa. Isso exige menor especialização na área de classificação de imagens, permitindo também a não especialistas em sensoriamento remoto obter bons resultados, em tempo relativamente curto. Além disso, resulta daí uma "integração total" de funções de SIG e sensoriamento remoto, tal como foi requerido num artigo de Ehlers et al. (1989), freqüentemente citado mas por muito tempo não atendido.

Até o momento há diversos procedimentos de segmentação de imagens, Blaschke (2000b), e os técnicos que desenvolveram o eCognition, analisaram e trabalharam intensivamente com as concepções existentes. Estabeleceram critérios para avaliação e compararam vários procedimentos, Baatz e Schäpe, 2000. Aos autores deste artigo parece ser mais relevante considerar a múltipla segmentação explícita em diferentes níveis (planos de informação) finais do aplicativo. Por meio



das opções de "pertinência" e "herança", é possível acessar a origem de cada objeto no conjunto de imagens. O seu potencial é enorme, porém problemas resultam da falta de uma fundamentação teórica e metodológica do ponto de vista ontológico e de teoria do reconhecimento: uma escolha fundamentada e justificada inter-subjetivamente das escalas do objeto ainda não está à vista no momento. Pesquisas referentes à desmistificação da "escala do objeto" (*object scale*) como medida essencial de um "nível" (*level*) escolhido, indicam caminhos para encontrar saltos especiais num comportamento contínuo de elementos em mudanças de escalas com resoluções finas. Blaschke e Hay (2001), tentam, com base numa teoria de espaço em escala linear (*linear scale space*), obter informações *a priori* em escalas especiais de dados de imagens, pela análise de hipérboles discretizadas dessa teoria, e Lang (neste volume) tenta, por meio de segmentações prévias, finamente delimitadas, obter previamente o comportamento escalar de categorias de objetos individuais de uma classificação. Somente quando é possível obter níveis de segmentação individuais baseados em conhecimento e, relacioná-los a uma declaração de saída, podemos falar de uma nova metodologia ou talvez sobre um novo paradigma. Atualmente observamos concepções de software interessantes e inovadoras. Por outro lado, poderia se argumentar da mesma forma que o procedimento até agora utilizado, de classificar *pixels* isoladamente com procedimentos estatísticos multivariáveis, não apresenta nenhuma base teórica, mas foi se estabelecendo mais ou menos dessa forma. Talvez se estabeleceu com a mesma espontaneidade como o primeiro satélite da série Landsat foi um scanner e não uma câmara de vídeo.

#### 1.4 Perspectivas de Aplicação – Monitoramento e Modelagem Ambientais

Para as tarefas de proteção do meio ambiente e da natureza, dados espaciais confiáveis e parâmetros de ecologia da paisagem são de grande importância. Para decisões de planejamento, dados básicos bem como os de entrada para a modelagem e a simulação desempenham um importante papel. O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para a obtenção desses dados na medida em que for capaz de fornecer dados atuais por preços razoáveis. Na maioria dos casos, conforme demonstrado pela prática até hoje, as fotos aéreas são usadas como importante apoio de mapeamentos no terreno, uma vez que já antes do trabalho de campo, podem ser demarcados limites bem perceptíveis. Com alguns dos métodos de processamento de imagens apresentados neste volume, são possíveis pela primeira vez, também "classificações inteligentes" para grandes conjuntos de imagens (p. ex. em ortofoto mosaicos). Isso não significa necessariamente um resultado melhor do que um foto-intérprete experiente pode alcançar. Kias et al. (2001). Talvez não se obtenha nem mesmo um resultado de qualidade igual. No entanto, o trabalho do foto-intérprete é apoiado, desde que ele possa calibrar o processo de foto-interpretção e desenvolver uma chave para a interpretação, a qual, na seqüência, permite uma reprodução, da maior parte da interpretação das imagens.

Estudos em andamento demonstram que procedimentos de sensoriamento remoto com base em objetos ou no contexto fornecem as estruturas básicas para a observação do meio ambiente. Não foi confirmada ainda a transferibilidade das regras de classificação. Esta condição deve ser teoricamente bem superior aos procedimentos baseados em *pixels*, apenas nos valores de reflexão, visto que seus valores absolutos variam devido a diferentes condições atmosféricas.

Especialmente em espaços de estruturação complexa, alguns dos métodos apresentados aqui apresentam vantagens em relação aos procedimentos de interpretação convencionais. Isso pode valer para espaços urbanos, mas também para estruturas no campo que apresentem uma variação interna significativa, textura ou características orientadas em formas que possam ser descritas com exatidão.

O potencial para o monitoramento ambiental poderia ser avaliado com base nos seguintes critérios:

- Possibilidade de objetividade permitindo uma grande independência do técnico-intérprete.
- A largura da faixa de possíveis erros de método (ou desvios de foco devidos à metodologia).
- Volume de trabalho: além do volume temporal, as exigências para com o técnico-intérprete são elevadas (na prática, do ponto de vista de custos considerando tratar-se de um estagiário, técnico formado ou especialista).
- Redução do trabalho de campo: espaços naturais difíceis, como p. ex. áreas de altas montanhas, alguns métodos já foram praticamente eliminados e outros estão sendo combinados com grande esforço.
- "Capacidade de associação" com outros planos de informação em SIG: com relação à "estruturação modular" do programa de monitoramento, dá-se preferência a métodos que permitam interfaces com outras pesquisas constantes (estruturação qualitativa, estrutura vertical e distribuição espacial).
- Padronização, opção de intercâmbio de métodos, condição de uso em longo prazo e
- O potencial de desenvolvimento.

## 1.5 Referências Bibliográficas

- BAATZ, M.; SHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Wichmann Verlag Heidelberg, pp. 12-23, 2000.
- BLASCHKE, T. Ohne Salz und Pfeffer. In: *GeoBIT 2/2000*, pp. 19-21, 2000a.
- BLASCHKE, T. Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. In: SCHRENK, M. (Hrsg.) *CORP'2000: Computergestützte Raumplanung*, Wien, Band 1, pp. 153-162, 2000b.
- BLASCHKE, T. Multiskalare Bildanalyse zur Umsetzung des patch-matrix Konzepts in der Landschaftsplanung. "Realistische" Landschaftsobjekte aus Fernerkundungsdaten. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 33 (2/3), pp. 84-89, 2001.
- BLASCHKE, T.; HAY, G. Object-oriented image analysis at multiple levels for modelling and representation of landscape structure. *ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: *GIS - Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, Heft 6, pp. 12-17, 2001.

- EHLERS, M.; EDWARDS, G.; BEDARD, Y. Integration of remote sensing with Geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, p. 11, pp. 1619-1627, 1989.
- ICHOKU, C.; KARNIELLI, A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation. *Remote Sensing Reviews*, 13, pp. 161-186, 1996.
- KIAS, U.; DEMEL, W.; SCHÜPFERLING, R. Zur Homogenisierung und Automatisierung von Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierungen im Alpenraum. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Hrsg.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIII*. Wichmann-Verlag, Heidelberg, pp. 267-273, 2001.
- MEINEL, G.; HENNERSDORE, J. Hochauflösende Satellitenbildmosaik in der Planungspraxis – Potentiale und Grenzen am Beispiel eines sachsenweiten IRS-1C-Mosaiks. In: SCHRENK, M. (Hrsg.) *CORP2000: Computergestützte Raumplanung*. Wien, Band 1, pp. 143-152, 2000.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GIS – Zeitschrift für Geo-Information-Systeme*, Heft. 6, pp. 34-39, 2001.

## Sensoriamento Remoto para Usuários de SIG – Sistemas Sensores e Métodos: entre as Exigências do Usuário e a Realidade

Manfred Ehlers

### 2.1 Introdução

O número de sistemas de sensoriamento remoto que podem fornecer aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), "famintos" por dados, informações atuais e sinópticas, vem aumentando significativamente nos últimos anos. Novas tecnologias, tais como o uso rotineiro de Sistemas de Posicionamento Global (GPS) e sistemas de satélites multissensores, bem como o desenvolvimento da fotogrametria digital, produzem geodados com resoluções espaciais, espectrais e temporais cada vez maiores (Ehlers, 2002a). A integração em Sistemas de Informações Geográficas permite o armazenamento e gerenciamento eficiente desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas.

Para tanto, os dados de sensoriamento remoto disponíveis não se limitam somente à observação da Terra, mas referem-se também aos estudos dos oceanos, da atmosfera e do magnetismo terrestre. Por isso, é admirável que esta fonte que "jorra" constantemente dados não seja usada adequadamente. Assim, há estudos que avaliaram que somente de 5% a 10% de todas as imagens de sensoriamento remoto arquivadas foram interpretadas (Ehlers, 1995). Além disso, aparentemente foram propagados sistemas sensores direcionados a progressos tecnológicos, ou seja, a critérios de fomento industrial, que, por isso, não conseguiram se impor no mercado. Uma outra característica são os preços de dados, em parte extremamente elevados, cobrados pelas empresas que os comercializam. Provavelmente é um despropósito supor que a construção de um sistema de satélite se justifica comercialmente. Sem programas de fomento públicos nacionais e internacionais, nenhum satélite jamais teria sido lançado.

É também um fato que as empresas de comercialização de programas de satélite são financiadas essencialmente por clientes públicos, para executar tarefas em conformidade com o bem-estar público. A partir disso, pode-se argumentar se o sensoriamento remoto por satélite não é uma tarefa pública, financiada pelas instituições correspondentes e que deveria ser disponibilizada, a baixo custo, para as respectivas tarefas. Enquanto programas de monitoramento representam somente um comprovante de concepção (*proof-of-concept*) ou que têm como ferramenta básica dados de satélite de baixa resolução, como aqueles do AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) ou do METEOSAT, não se pode falar de uma operacionalidade visando a uma utilização auto-sustentável.

### 2.2 Taxonomia de Sistemas de Sensoriamento Remoto

Existe um grande número de opções para a descrição e discriminação de sistemas de sensoriamento remoto. "Sensoriamento remoto" é geralmente definido como "a obtenção de

informações sobre objetos distantes, sem contato com os mesmos" (Konecny e Lehmann, 1984). Neste desenvolvimento, o moderno sensoriamento remoto afastou-se fortemente de sua origem: a fotografia aérea. Para a transmissão de informações, ao lado da luz na faixa do visível, são usados também outros comprimentos de onda eletromagnética, que se encontram no infravermelho próximo e médio, no infravermelho termal ou na faixa de microondas (radar). Os modernos dados de sensoriamento remoto provêm predominantemente de satélites e são imediatamente registrados digitalmente. Os sistemas são discriminados tipicamente se possuem sensores passivos, isto é, se registram a radiação refletida ou emitida da superfície terrestre, ou se dispõem de um modo de imageamento ativo, que lhes permite ter uma fonte de iluminação praticamente própria, e assim permitir o imageamento diurno ou noturno. Dentre esses últimos, incluem-se, por exemplo, sistemas a laser e radar.

Uma outra discriminação de sistemas sensores é representada pela escolha da plataforma de observação, que diferencia tipicamente entre sistemas orbitais e os aerotransportados. Por outro lado, existem ainda outras plataformas tais como balões, sistemas de vôo voadores de controle remoto ou torres elevatórias para observações próximas ao solo. Outras diferenciações referem-se à resolução espectral ou areolar bem como à profundidade radiométrica. A Tab. 2.1 resume as concepções das possíveis taxonomias de sistemas de sensoriamento remoto.

Tab. 2.1 Taxonomia de sistemas de sensoriamento remoto

Taxonomia de Sistemas de Sensoriamento Remoto						
Plataforma de gravação	Satélite / Shuttle		Avião / Balão		Estacionário	
Modo de gravação	Passivo (visível, infravermelho próximo, infravermelho termal, microondas termal)			Ativo (laser, radar)		
Meio de gravação	Analogico (câmara, vídeo)			Digital (Whiskbroom, Line array, 2D CCD)		
Cobertura espectral	Visível / Ultravioleta	Infravermelho refletido		Infravermelho termal	Microondas	
Resolução espectral	Panromático 1 banda	Multiespectral 2 - 20 bandas	Hiperspectral 20 - 250 bandas		Ultra-espectral > 250 bandas	
Resolução radiométrica	Baixa (< 6 bit)		Média (6 - 8 bit)		Alta (8 - 12 bit)	Muito alta (> 12 bit)
Resolução espacial no solo	Muito baixa > 250 m	Baixa 50 - 250 m	Média 10 - 50 m	Alta 4 - 10 m	Muito alta 1 - 4 m	Ultra-alta < 1 m

Fonte: Ehlers et al., 2002a

## 2.3 Sistemas de Satélites

### 2.3.1 Sistemas multispectrais de elevada e média resolução

A partir de um número de sistemas sensores orbitais operacionais, serão mencionados, a título de exemplo, os sistemas de varredura (*scanners*) multispectrais, que atualmente fornecem o maior volume dos dados de sensoriamento remoto utilizados. Os dados de radar, cuja importância para a oceanografia e finalidades militares, por exemplo, é inquestionável, não

serão tratados mais detalhadamente, visto que ainda não são considerados operacionais para a análise da Terra. Com resoluções geométricas de 2,5 m (SPOT 5) no modo pancromático e até 60 m (Landsat ETM) na faixa espectral do termal, os *scanners* multiespectrais são definidos como sistemas de satélite de resolução espacial alta a média. Para aplicações que exigem um componente multiespectral, esses sistemas fornecem uma resolução espacial de 20-30 m, podendo ser interpretados por meio do uso de procedimentos padronizados de processamento de imagens (ver, a propósito, também o Cap. 6 deste volume). A Tab. 2.2, a seguir, apresenta uma visão de conjunto dos sistemas de satélite atualmente em operação, incluindo o SPOT (França), o Landsat (EUA) e o IRS (Índia).

**Tab. 2.2** Missões de satélites de resolução média a muito alta (seleção)

Empresa/ Instituição	NASA / EUA		CNES / França		NRSA / Índia	
Sistema	Landsat 7 ETM		SPOT 3/4 HRV		IRS 1 C/D	
Modo	Pan	MS + termal	Pan	Multiespectral	Pan	Multiespectral
Resolução geométrica	15m	30 m (60 m IV t.)	10 m	20 m	5,8 m	23,5 m
Resolução espectral (nm)	520 - 900	450 - 520 (az.) 530 - 610 (v.) 620 - 690 (vm.) 780 - 910 (IV p.) 1570 - 1780 (SWIR) 10420 - 12500 (IV t.) 2080 - 2350 (IV m.)	480 - 710	500 - 590 (v.) 610 - 680 (vm.) 790 - 890 (IV p.) 1580 - 1750 (IV m.)	500 - 750	520 - 590 (v.) 620 - 680 (vm.) 770 - 880 (IV p.) 1550 - 1700 (IV m.)
Escala para aplicações	1:100.000		1:50.000		1:25.000	
Tamanho da cena imageada	185 x 185 km		60 x 60 km		23 x 23 km ou 70 x 70 km	
Alt. da órbita	704 km		832 km		817 km	
Inclinação	98,2° solssíncrono		98,7° solssíncrono		98,1° solssíncrono	

**Convenções:** Pan = pancromático, MS = Multiespectral, az. = azul, v. = verde, vm = vermelho, IV p. = infravermelho próximo, IV m. = infravermelho médio, IV t. = infravermelho termal.

Um exemplo sintomático é o Landsat ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), mapeador temático realçado, o qual, desde que retornou ao financiamento público, ganhou em interesse de uso. Por um lado, ao incluir um canal pancromático, ele passou a ter uma resolução espacial melhorada para 15 m; por outro lado, a aquisição de cenas do Landsat tornou-se bem mais barata. A sua largura de banda espectral torna-o utilizável para muitas aplicações e solução de problemas, sendo que os dados arquivados até 1982 o transformaram na ferramenta ideal para a utilização em programas de monitoramento. Isto é completado por uma boa qualidade geométrica e radiométrica, que foi muito analisada e permite avaliar os dados com pacotes de processamento de imagens-padrão. Com um tamanho de cena de 185 x 185 km, dentre todos os satélites de resolução média, ele fornece a maior cobertura regional tendo, assim, uma atrativa relação custo/benefício. No entanto, a limitação da resolução devida à tecnologia de *scanner* e da

altitude de imageamento, não permite sua utilização para aplicações em regiões urbanas e com elevadas exigências de precisão.

### 2.3.2 Sistemas de satélites de resolução muito alta

Novos sistemas, cujo desenvolvimento provém, por um lado, dos satélites de espionagem da última geração, e por outro, do desenvolvimento de *scanners* hiperespectrais, são considerados as "grandes expectativas" do desenvolvimento do sensoriamento remoto. Espera-se especialmente dos sistemas de satélites comerciais de resolução máxima que tenham o potencial de representar um desafio para as fotografias aéreas. Com resoluções no solo de até 0,6 m (modo pancromático) e 3-4 m (modo multiespectral), esses sistemas sensores orbitais poderão ser utilizados pela primeira vez em aplicações de planejamento em áreas urbanas (Möller, 2003).

Por meio de um processamento extremamente rápido, os dados deverão estar disponíveis, via Internet, em horas até dias, como ficou demonstrado cada vez que ocorriam catástrofes da natureza. Sistemas de imageamento giratórios colocam os satélites em condições de, em aproximadamente 2-3 dias, imagear qualquer ponto da Terra. Em função disso, podem ser aproveitados também períodos curtos sem cobertura de nuvens, para se obterem informações atuais e muito precisas sobre as condições da nossa Terra (Ehlers, 2004). Após o lançamento bem-sucedido do satélite Ikonos 2 da empresa Space Imaging, o número de satélites de resolução muito alta aumentou intensamente (ver Tab. 2.3). Como exemplo, a Fig. 2.1 mostra uma imagem do satélite Ikonos 2 do centro da cidade de Bremen (Alemanha).

Os sistemas de varredura (*scanner*) hiperespectrais, que até agora têm sido usados somente em aviões como plataforma de obtenção de dados, estão neste momento ainda sendo utilizados como protótipos em plataformas de satélite. O primeiro satélite hiperespectral comercial OrbView-4 (200 canais hiperespectrais com 8 m de resolução no solo), lançado pela Firma Orbimage em 21 de setembro de 2001, infelizmente não alcançou a sua órbita. Os primeiros sistemas de satélites hiperespectrais estarão disponíveis somente daqui a alguns anos.



Fig. 2.1 Imagem do satélite Ikonos 2 (pancromática) da cidade de Bremen, Alemanha. Resolução original: 1 m

Esses sistemas sensores, por um lado, abrem mais perspectivas e chances para o sensoriamento remoto enquanto, por outro, questionam as metodologias até agora estabelecidas, para a análise dos dados obtidos. A Tab. 2.3, a seguir, apresenta uma visão de conjunto dos sistemas de satélite disponíveis atualmente e planejados com resolução espacial máxima. A maior resolução dentre todos os satélites civis de sensoriamento remoto (aprox. 60 cm) atualmente é obtida pelo satélite Quickbird-2 da DigitalGlobe. Uma melhoria adicional dos sistemas eletroópticos até aproximadamente 45 cm (*Worldview*) está projetada, bem como satélites de radares imageadores com resolução no solo de aproximadamente 1 m devem ser lançados neste ano (TerraSAR-X).

Tab. 2.3 Admissões de satélites com alta e extremamente alta resolução (seleção) (cf. Ehlers, 2002:26, <http://www.digitalglobe.com>, <http://www.spaceimaging.com>, <http://www.orbimage.com>, <http://www.imagesat.com>)

Sistema	Digital Globe, EUA			GeoEye (ORBIMAGE & SPACE IMAGING), EUA		
	QuickBird 2 (Lanç.: 2001)	WorldView 1 (Lanç.: 2007)	WorldView II (Lanç.: 2008)	IKONOS II (SPACE IMAGING) (Lanç.: 1999)	OrbView-3 (ORBIMAGE) (Lanç.: 2003)	GeoEye-1 (ORBView-5) (Lanç.: 2007)
Modo	Pan: MS 4 bandas 11 bit	Pan: MS 8 bandas 11 bit	Pan: MS 8 bandas 11 bit	Pan: MS 4 bandas 11 bit	Pan: MS 4 bandas 11 bit	Pan: MS 4 bandas 11 bit
Resol. geométrica	0,61 m	0,45 m	1,5 m	4 m	1 m	1,41 m
Resol. espectral	450-900 450-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)	N/D	N/D	450-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)	450-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)	450-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)
Faixa Imagem	16,5 km	16 km	16,4 km	11,3 km	8 km	15,2 km
Tamanho da cena	16,5 x 16,5 km <sup>2</sup> Faixa: 16,5 x 16,5 km <sup>2</sup>	N/D	N/A	11 x 11 km <sup>2</sup>	8 x 8 km <sup>2</sup>	15 x 15 km <sup>2</sup>
Altitude da órbita	450 km	450 km	770 km	587 km	470 km	884 km
Inclinação	97,2° Sol-síncrono	Sol-síncrono	Sol-síncrono	98,1° Sol-síncrono	97° Sol-síncrono	98° Sol-síncrono
URL	<a href="http://www.digitalglobe.com">www.digitalglobe.com</a>					
Empresa	ImageSat International, Israel			CNES, França		
Sistema	EROS A (Lanç.: 2000)	EROS B (Lanç.: 2005)	EROS C (Lanç.: 2007)	SPOT-5 (Lanç.: 2002)		
Modo	Pan: 11 bit	Pan: 11 bit	Pan: MS 11 bit	MS 5 bandas 8 bit	Pan	MS 4 bandas
Resol. geométrica	1,8 m	0,7 m	0,7 m	2,5 m (Supermodo resçado) 5,0 m (Modo normal)	10 m (swt 20 m)	0,7 m
Resol. espectral	500-900	400-800	400-800	410-470 (az) 500-580 (vd) 610-680 (vm) 750-890 (V p.) 1580-1750 (swt)	470-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)	470-520 (az) 520-600 (vd) 600-650 (vm) 750-900 (V p.)
Faixa Imagem	13,5 km	14 km	11 km	60 km	20 km	20 km
Tamanho da cena	13,5 x 13,5 km <sup>2</sup> Cena vertical: 13,5 x 40 km <sup>2</sup>	60 x 60 km <sup>2</sup>	822 km	604 km	604 km	604 km
Altitude da órbita	480 km	~500 km	~500 km	98,7° Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono
Inclinação	97,3° Sol-síncrono	Sol-síncrono	Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono
URL	<a href="http://www.imagesatintl.com">www.imagesatintl.com</a>					
URL	<a href="http://amsat.cnas.fr/PLEIADES/index.htm">http://amsat.cnas.fr/PLEIADES/index.htm</a>					



Tab. 2.3. Missões de satélites com alta e extremamente alta resolução (seleção) (cf. Ehlers, 2002B, <http://www.digitalglobe.com>, <http://www.spaceimaging.com>, <http://www.orbimage.com>, <http://www.imagingat.com> (continuação))

Empresa	NASO (National Space Organization); Taiwan	ISRO (Indian Space Research Organization); Índia	KARI (Korean Aerospace Research Institute); Coreia do Sul
<b>Sistema</b>	Formosat-2 (Lanç. 2004)	Cartosat-1 (IRS-P3) (Lanç. 2005)	COMSAT-2 (Lanç. 2006)
<b>Modo</b>	Push 12 bit 2 m	Push 10 bit 2,54 m	Push 10 bit 1 m
<b>Resol. geométrica</b>	MS 4 bandas 12 bit 3 m	Push 10 bit 2,54 m	MS 4 bandas 10 bit 4 m
<b>Resol. espectral</b>	450-500 520-550 (nd) 630-690 (vm) 780-900 (IV p.)	500-850	450-520 (nd) 520-600 (vd) 630-690 (vm) 780-900 (IV p.)
<b>Faixa imageada</b>	24 km	25,4 km	15 km
<b>Tamanho da cena</b>	24 x 24 km <sup>2</sup>	25 x 20 km <sup>2</sup>	15 x 15 km <sup>2</sup>
<b>Altitude da órbita</b>	801 km	515 km	635 km
<b>Inclinação</b>	99,14° Sol-síncrono	96,87° Sol-síncrono	96° Sol-síncrono
<b>URL</b>	<a href="http://www.naspo.org.tw/2005a">www.naspo.org.tw/2005a</a>	<a href="http://www.isro.org">www.isro.org</a>	<a href="http://www.spaceimga.ir">www.spaceimga.ir</a>
<b>Empresa</b>	Orbéo, SSTL (Barnes Satellite Technology Ltd.), InfoTerra Ltd. & EAL (Bullfinch Applied Laboratory); Reino Unido	JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency); Japão	AISB (Astronautic Technology (U) Sch. Proj) & BATHO (BATHO Innovative Co. Ltd.); Malásia, Coreia
<b>Sistema</b>	TopSat (Lanç. 10/2005)	ALOS (Lanç. 11/2006)	Radsat (Lanç. 2006)
<b>Modo</b>	Push 2,5 m (a 600 km) 2,85 m (a 295 km)	Push 3,5 m	Push 10 bit 10 bit
<b>Resol. geométrica</b>	MS 3 bandas 5 m (a 600 km) 5,7 m (a 686 km)	MS 4 bandas 10 m	MS 4 bandas 10 bit 5 m
<b>Resol. espectral</b>	500-700	600-770	420-500 (nd) 520-600 (vd) 630-690 (vm) 780-900 (IV p.)
<b>Faixa imageada</b>	15 km/17 km	35 km (Modo Impact) 70 km (Modo Nadir) Modo varredura larga	70 km
<b>Tamanho da cena</b>	15 x 15 km <sup>2</sup> (a 600 km) 17 x 17 km <sup>2</sup> (a 686 km)	16,17° Sol-síncrono	20 km
<b>Altitude da órbita</b>	600 km/686 km	692 km	635 km
<b>Inclinação</b>	98,2° Sol-síncrono	16,17° Sol-síncrono	9° NBO sol-síncrono, Neco (Near Equatorial Low Earth Orbit)
<b>URL</b>	<a href="http://www.orbis.ac.uk">www.orbis.ac.uk</a> , <a href="http://www.infoterra.co.uk">www.infoterra.co.uk</a> , <a href="http://www.gheq.com">www.gheq.com</a>	<a href="http://www.erc.or.jp">www.erc.or.jp</a>	<a href="http://mlab-analysis.com">http://mlab-analysis.com</a> , <a href="http://www.satimg.com">www.satimg.com</a>

Tab. 2.3. Missões de satélites com alta e extremamente alta resolução (seleção) (cf. Ehlers, 2002B, <http://www.digitalglobe.com>, <http://www.spaceimaging.com>, <http://www.ordimage.com>, <http://www.imagesat.com>) (continuação)

Empresa	RapidEye AG	GISTDA (Geo-Informatics and Space Technology Development Agency) Tailândia	CNRS (Algerian National Space Technology Centre) & EADS Astrium; Algéria, França	CAST (China Academy of Space Technology) & INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais); China, Brasil
Sistema	RapidEye (Constelação 5 Satélites) (Lanç. 2007)	THEOS (Thailand Earth Observation System) (Lanç. 2007)	ASAT-2 (Algeria SAT-1/a) - Constelação de 2 satélites ALSAT-2A & ALSAT-2B (Lanç. 2008)	CBERS-2b (China-Brazil Earth Resources Satellite) (Lanç. 10/2007)
Modo Resol. geométrica	MS 5 bandas 6,5 m 440-510 (az) 520-590 (vd) 630-685 (vr) 690-730 (ood edge) 760-850 (IV p.)	Pan 2 m 450-000	Pan 2,5 m 10 m	Pan 2,5 m 20 m
Resol. espectral	MS 5 bandas	MS 15 m 450-520 (az) 530-600 (vd) 620-690 (vr) 770-900 (IV p.)	MS 4 bandas	MS 4 bandas 450-630 (az) 520-590 (vd) 630-690 (vr) 770-890 (IV p.) 510-730 (Pan)
Faixa imageada	~78 km	22 km	17,5 km	27 km
Altitude da órbita	620 km	822 km		776 km
Inclinação	97,1° Sol-síncrono	98,7° Sol-síncrono	Sol-síncrono órbita polar	96,7° Sol-síncrono, órbita polar
URL	<a href="http://www.dlr.de">www.dlr.de</a>	<a href="http://www.space.nasr.net">www.space.nasr.net</a>	<a href="http://www.space-eo.com">www.space-eo.com</a>	<a href="http://www.zbers.inpe.br">www.zbers.inpe.br</a>

#### Observações

- TopSat: Diferença de altitude: vice brochura da info item p. 5;
- As características do terceiro sensor do ALOS se encontram na Tabela SARL;
- Fonte THEOS: ACRS2006 THEOS.pdf;
- Sem informações sobre Oke-5, satélite espão israelense, lançado em 2002, Resolução = 1 m e Oke-7, lançamento previsto para 2007.

#### Legenda

- az = azul
- vd = verde
- vr = vermelho
- IVp = Infravermelho próximo
- PAN = Panorâmico
- MS Multiespectral
- SWIR = Short Wave Infrared
- ND = Não disponível

Tab. 2.3 Missões de satélites com alta e extremamente alta resolução (seleção) (cf. Ehlers, 2002B; <http://www.digitalglobe.com>, <http://www.spaceimaging.com>, <http://www.orbimage.com>, <http://www.imagesat.com>) (continuação)

<b>Empresa</b>	SAST (Shanghai Academy of Spaceflight Technology) etc., China		DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) & EADS Astrium GmbH, Alemanha	
<b>Sistema</b>	REMOTE SENSING SATELLITE-1 (JIANPING-5/Yaogan-1) (Lanç.: 4/2008)		TerraSAR-X (Lanç.: 10/2006)	
<b>Modo</b>	Alta Resolução Spotlight (SL)		Tandem-X (Adicionado a TerraSAR X para medição de elevação digital) (Lanç.: 2009)	
<b>Resolução geométrica</b>	1 m		1 m (2 m)	
<b>Frequência</b>	Banda I		Banda X	
<b>Polarização</b>	HH, VV, HV, VH (simples ou dupla)		Mono, Dual, Quad	
<b>Faixa imageada</b>	10 km		10 km	
<b>Tamanho da cena</b>	5 x 10 km <sup>2</sup> (HS)		5 x 10 km <sup>2</sup> (10 x 10 km <sup>2</sup> )	
<b>Altitude da órbita</b>	503 km		514 km	
<b>Inclinação</b>	97,9° Sol-síncrono		97,4° Sol-síncrono	
<b>URL</b>	<a href="http://www.terra1a.de">www.terra1a.de</a>		<a href="http://www.dlr.de">www.dlr.de</a>	
<b>Empresa</b>	JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) Japão		ASI (Italian Space Agency) Itália	
<b>Sistema</b>	ALOS (Lanç.: 1/2006)		Cosmo-SkyMed (Constelação de 4 satélites) (Lanç.: 2006-2008)	
<b>Modo</b>	Resolução fina		HIMAGE WideRegion (ScanSAR)	
<b>Resolução geométrica</b>	10 m		3-15 m	
<b>Frequência</b>	Banda L (1,27GHz)		Banda X (9,6 GHz)	
<b>Polarização</b>	HH, VV, HV & VH		HH, VV, HV or VH (simples)	
<b>Faixa imageada</b>	70 km		10 km	
<b>Tamanho da cena</b>	250-350 km		-40 km	
<b>Altitude da órbita</b>	602 km		-100 km	
<b>Inclinação</b>	98,17° Sol-síncrono		97,86° Sol-síncrono	
<b>URL</b>	<a href="http://www.eos.jaxa.jp">www.eos.jaxa.jp</a>		<a href="http://www.asi.spazio.it">www.asi.spazio.it</a>	

Tab. 2.3 Missões de satélites com alta e extremamente alta resolução (seleção) (cf. Ehlers, 2002b, <http://www.digitalglobe.com>, <http://www.spaceimaging.com>, <http://www.orbimage.com>, <http://www.imagesat.com>) (continuação)

<b>Empresa</b>	CSA (Canadian Space Agency) & MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.); Canadá		ISRO (Indian Space Research Organization); Índia	
<b>Sistema</b>	RadarSat-2 (Lanç. previsto 3/2007)		Rosat (Radar Imaging Satellite) (Lanç. 2007)	
<b>Modo</b>	7 modos de feixes compatíveis com RadarSat-1 e 5 modos adicionais	Alta resolução Spotlight Mode (SRS)	Resolução fina StripMap Mode-1 (FRS-1)	Resolução fina StripMap Mode-2 (FRS-2)
<b>Resolução geométrica</b>	3-100 m	<2 m	3 m	12 m
<b>Frequência</b>	Banda C (5-400 GHz)			Banda C (5,35 GHz)
<b>Polarização</b>	HH, HV, VH, VV		Pol. conforme eixo cruzada	Quad polarização
<b>Feixe imagiada</b>	10-500 km	10 km	30 km	30 km
<b>Tamanho da cena</b>		10 x 10 km <sup>2</sup>		125 km
<b>Altitude da órbita</b>	780 km			240 km
<b>Inclinação</b>	95,6° quase polar, sul-síncrono			Pol. conforme eixo cruzada
<b>URL</b>	<a href="http://www.radsat2.info">www.radsat2.info</a> , <a href="http://www.space.gc.ca">www.space.gc.ca</a>			Pol. conforme eixo cruzada
				240 km
				600 km
				Sol-abscuro
				<a href="http://www.isro.org">www.isro.org</a>

## 2.4 Sistemas Digitais Aerotransportados

A utilização conseqüente de avanços tecnológicos na aerofotogrametria colocou movimento numa tradição de sensoriamento remoto que, às vezes, foi considerada ultrapassada. Por meio do desenvolvimento de sistemas sensores com registro digital e qualidade fotogramétrica, o sensoriamento remoto aerotransportado está passando por um certo "renascimento". Aviões equipados com sistemas GPS para a determinação de posições e sistemas de navegação inercial com alta freqüência de ritmo, que possam determinar a posição e a direção da plataforma de detecção, asseguram o registro de dados de imagens multispectrais, com elevada precisão geométrica; essa precisão e radiometria satisfazem às exigências de precisão fotogramétricas. Depois que, inicialmente, câmeras digitais de alta qualidade da eletrônica de laser foram utilizadas, nos últimos anos, chegaram ao mercado desenvolvimentos de sistemas que irão substituir as câmaras aerofotográficas analógicas. No último ano, já foram vendidas mais câmaras aerofotográficas digitais do que sistemas analógicos, de modo que o ponto de não-retorno já deve ter sido alcançado.

As vantagens dos *scanners* digitais, quais sejam a melhor sensibilidade radiométrica, a integração digital direta e sem perdas num SIG (permitindo assim um "não-envelhecimento" da tomada de dados), até agora foram suprimidas pelas imprecisões geométricas, que até então também não podiam ser corrigidas por procedimentos digitais, além do registro monoscópico, que não permitia interpretações em estereoscopia. A geometria, devido ao uso de GPS e INS (Sistemas de Navegação Inercial), não constitui mais um problema para o usuário, em paralelo à integração conseqüente com procedimentos fotogramétricos, sendo que a informação tridimensional é assegurada pelo uso de *Triplet-Stereo*, ou seja, por tecnologia CCD bidimensional.

A Tab. 2.4 apresenta, novamente como exemplo, um número de câmaras digitais da classe de sistemas sensores de ultra-alta resolução. Convém lembrar que a resolução obviamente depende da altitude de voo (Schiewe e Ehlers, 2004).

Por outro lado, é importante mencionar que a interpretação de dados aerotransportados de altíssima resolução coloca problemas maiores ainda do que a análise dos dados de satélite de muito alta resolução, visto que a resolução no solo foi melhorada numa escala de grandeza adicional. Ao contrário dos efeitos integradores da filtragem passa baixa de resolução média, nos dados de imagem de altíssima resolução não ocorre nenhuma agregação de objetos (e, com isso, uma homogeneização dos níveis de cinza), porém uma divisão de objetos em vários *pixels* (então não-homogêneos), que, no entanto, pertencem à mesma classe. Para esses tipos de sistemas sensores, precisam ser encontrados novos procedimentos de interpretação automáticos, quando não se deseja interpretar dados de imagens digitais por técnicas de fotointerpretação, por meio de digitalização na tela (*on-screen-digitizing*). Aqui é necessário preparar previamente os dados da imagem, utilizando-se a integração de conhecimento prévio (verdade terrestre) e modelos, bem como pela estruturação anterior de características baseadas no contexto, de modo que seja possível uma interpretação automática. As técnicas que atualmente desempenham um grande papel na estruturação prévia das imagens são, por um lado, a segmentação baseada em contexto, a integração de multissensores e multimétodos, bem como, por outro lado, a integração de todas as informações prévias e dados de imagens em Sistemas de Informações Geográficas. Essa melhoria da integração de SIG e sistemas de análise de imagens é uma das componentes que acompanha, como desenvolvimento tecnológico, a discussão científica na nova disciplina em formação, conhecida como "Geoinformática". Este desenvolvimento é resumido a seguir.

Tab. 2.4. Sistemas imageadores scanner aerotransportados de resolução extremamente elevada

Sensor	HRSC/AX	OROS	ADSR-40	UltraCam-D	OMC	AIC (rel-graf)
Empresa	DLR	Applied (Emerge)	Leica Geosystems	Vexcel Corp.	Zi Imaging	Relief
URL	www.itz.de	www.emergis.com	www.gis-leica-geosystems.com	www.vexcel.com	www.ziimaging.com	www.relie.com
Tipo de sensor	CCD em linha	CCD em área	CCD em linha	CCD em área	CCD em área	
Ano da introd.	2000	2004	2000	2003	2002	
Distância focal	151 mm	50 mm (câmb. & IV color.) 35 mm (monocrom. color.)	52.7 mm	100 mm (26 mm multispectral)	120 mm (25 mm multispectral)	40 - 500 mm
Campo de visão	25°	37° x 55.4°	64°	55° x 37°	7.4° x 4.4°	
# CCD em linhas	0	1	7	9	8	
- Câmera matricial						
# CCDs	12-172	4077	2 x 12 000 (pan)	11 500 (pan)	13 824 (pan)	4076 (db44)
Transversal à linha de voo		12 000 (ms)	4036 (ms.)	3 870 (ms)	3 870 (ms)	5440 (db45)
# CCDs						
Prebleto à linha de voo						
Tam. do sensor	6.5 µm	9 µm	6.5 µm	9 µm	12 µm	9 µm
Resolução radiométrica	12 bit	12 bit	12 bit	> 12 bit	12 bit	12 bit
Resolução espectral (nm)	630-700 (pan) 450-510 (az) 530-570 (vd) 542-682 (vm) 770-814 (IV p)	Modo RGB 400-500 (az) 600-600 (vd) 600-680 (vm)	Modo IV color a 405-600 (pan) 438-492 (az) 512-575 (vd) 605-682 (vm)	390-650 (pan) 390-470 (az) 420-550 (vd) 620-680 (vm)	400-500 (pan) 400-580 (az) 500-650 (vd) 590-675 (vm)	675-850 (IV p)
Frequência de leitura	1040 linhas/seg	0.25 imagens/seg	800 linhas/seg	0.75 imagens/seg	0.5 imagens/seg	4.7 seg/image (db44) 3 seg/image (db45)
Estabilização	Plataforma Zeiss T-AS	Plataforma própria	Plataforma LH	Plataforma própria	Plataforma Zeiss T-AS	
Gravação de dados	Gravação em alta velocidade	80 GB disco rígido permutável	MMAO amostr. de massa	Sistema de disco RAID	SCU (> 1 TB)	
Suorreferência-ponto	Applied POS/90	Applied POS 9MU	Applied POS 9MU	Applied POS 810 GPS/MR	Não especificado	

Tab. 2.4 Sistemas Imageadores scanner aerotransportados de resolução extremamente elevada (continuação)

Sensor	AIC mediar	3-DAS-1	DIMAC	JAS 150	NoxVue
Empresa	Relei	WebImageco, Inc	DIMAC SYSTEMS	Jura-Optikon GmbH	Spectrum Mapping, LLC
URL	www.relei.com	www.webimageco.com	www.dimac-camera.com	www.jura-optikon.de	www.spectrummapping.com
Tipo de sensor		CCD em linha	CCD em área	CCD em linha	CCD em área
Ano de introd.		2004	2004	2005	
Distância focal	40 - 150 mm	110 mm	55 - 120 mm	150 mm	50 - 90 mm
Campo de visão		36°	44° com lente de 60 mm s		40° com lente de 50 mm 23° com lente de 90 mm
# CCD em linhas (Câmera matricial)		9		9	
# CCDs	4000	6023	5412	12000	4080
Transversal à linha de vôo	4092				
# CCDs	4000		7216		4080
Paralelo à linha de vôo	5436				
Tam. do sensor	9 µm	9 µm	9 µm	6,5 µm	9 µm
Resolução radiométrica	12 bit	14 bit	8-18 bit	12 bit	12 bit
Resolução espectral (µm)				520-760 (µm) 440-510 (80) 520-580 (µm) 620-680 (nm) 780-950 (0V p)	
Frequência de leitura		800 linhas/seg			< 2,5 seg/quadro
Estabilização		Plataforma própria		T-AS, RW30, SM-2000, GSM 2000	Não especificado
Gravação de dados		Aus 2 TB HDD - hot swapable	2 HDDs RAID-1 de 500 GB removíveis option	1.6 TB Raid 3	
Georreferenciamento		Appbox POS IMU		IGHERCONTROL ou Appbox POS AV 510	Optical Appbox Pos AV

Tab. 2.4 Sistemas imageadores scanner aerotransportados de resolução extremamente elevada (continuação)

Empresa	DLR		Zeiss	
Nome do sistema	High Resolution Stereo Camera - Airborne (HRSC-A) Prototipo: 1999		RMK TOP RC 30	
Modos	pan	MS 4 bandas	MS 3 cores (az, ve, vm) (p.ex. Kodak Aerochrom) (Infrared)	MS 3 cores (vd, vm, IV p) (p.ex. Kodak Aerochrom Infrared)
Resol. espacial (Altitude de voo Height 3.000 m)	0,15 m	0,15 m	Depende do filme: 0,10 - 0,30 m	Depende do filme: 0,10 - 0,30 m
Cobertura espectral (nm)	595-765	305-465 (az) 485-575 (vd) 730-770 (IV p) 925-1015 (IV p)	ap 400-800 (vd) ap. 450-800 (v0) ap 500-700 (v)	ap. 400-800 (vd) ap. 550-700 (vm) ap. 550-800 (IV p)
Maior escala de aplicação	0,368888889		1:500 - 1:1500	
Custos de imagem (€)	100 + 300/km <sup>2</sup>		ca. 50/ha <sup>2</sup>	

\* vide Smith-et-al, 2005\_UltraCam-D.pdf, S. 3

- Muitas informações obtidas de Coblenz 2005 (Earth Imaging Journal)



## 2.5 Geoinformática – uma Disciplina Científica para SIG e Sensoriamento Remoto?

### 2.5.1 Desenvolvimento da geoinformática

O estabelecimento da Geoinformática como uma disciplina individualizada, se bem que ainda em parte desprezada por alguns cientistas (debate de Ferramenta *versus* Ciência), de fato já ocorreu. Existem manuais, cursos universitários, reuniões científicas e periódicos de Geoinformática. Como em todas as disciplinas novas e em formação, trata-se de um processo dinâmico que se baseia em diversos desenvolvimentos e que, em função disso, apresenta-se de diversas formas, nas paisagens de ciência da Alemanha, Europa e EUA.

Dependendo do direcionamento e da sua origem, a forma do desenvolvimento da Geoinformática é bastante diferente. Pode ser do tipo geodésico, geográfico/planejamento ou de tecnologia da informação e apresentar, como pontos principais, o registro, a modelagem e apresentação de geodados, a análise geográfica, a elaboração do planejamento digital ou, ainda, o desenvolvimento de modelos de bancos de dados e algoritmos representados em área. Convém lembrar que a Geoinformática não é nenhuma colcha de retalhos de componentes individuais sem nenhuma associação entre si, consistindo, porém, de uma concepção inter-relacionada e integrada para o registro, armazenagem, análise, modelagem e apresentação de geoprocessos (Ehlers, 2006a). Conforme a direção tomada por esta concepção, a Geoinformática pode ter se originado da Geografia, Geodésia, Informática, Planejamento do Espaço ou da Arquitetura, ou pode estar integrada como disciplina parcial, dentro dessas áreas de conhecimento (Tab. 2.5).

Tab. 2.5 Possíveis componentes de Geociências e de Informática na Geoinformática

GEOCIÊNCIA	INFORMÁTICA
Geografia	Tecnologia computacional
Cartografia	Informática, processamento de informações
Geodésia e topografia	Tecnologia de telecomunicações
Fotogrametria e sensoriamento remoto	Desenvolvimento de bancos de dados, sistemas de informação
Planejamento do espaço, arquitetura da paisagem	Matemática, estatística

Observa-se, de modo geral, que a Geoinformática está cada vez mais fortemente integrada na tendência geral da Tecnologia de Informação (TI). Dados espacializados, constituem um Plano de Informação extremamente importante para, provavelmente, todas as tomadas de decisão políticas e de planejamento. Como consequência disso, por exemplo, tem sido ressaltada cada vez mais a importância dos componentes de geoinformação também nos programas de fomento da União Européia, para a nova infra-estrutura de tecnologia da informação (Brand, 1995; Burrough et al., 1997; Reginster, 1999).

## 2.5.2 Integração de sensoriamento remoto e SIG

Uma das vantagens inerentes da disciplina em desenvolvimento "Geoinformática" é a integração cada vez mais forte das duas componentes parciais SIG e Sensoriamento Remoto, ou seja, o processamento de imagens associado a ela. As vantagens da integração de dados de Sensoriamento Remoto, como fonte atual de informação, num SIG, são especialmente demonstradas de forma cada vez mais convincente, em projetos de aplicação (ver, a propósito, Star et al., 1997). Por outro lado, a integração do sensoriamento remoto/processamento de imagens em sistemas de informações geográficas muitas vezes é utilizada somente para produzir mais uma das *GIS-Layers* com informações pictóricas freqüentemente "desinteligentes". Uma integração efetiva de SIG somente ocorre por intermédio de um georreferenciamento e sobreposição adequados. A análise completa da imagem para o geoobjeto num SIG somente é concluída por um procedimento manual de interpretação. As informações de SIG e sensoriamento remoto são interpretadas separadamente.

Já em 1989, Ehlers et al. apresentaram uma concepção sistêmica para a integração completa de sensoriamento remoto e SIG. Neste enfoque, estes autores diferenciavam entre: (a) dois sistemas separados com uma interface de dados; (b) dois sistemas fundamentalmente separados com uma interface de usuários comum; e (c) um sistema completamente integrado (Ehlers et al., 1989). Atualmente quase todos os SIGs permitem tipicamente processamentos híbridos (isto é, o processamento de dados vetoriais e *raster*) e possuem uma componente para a integração de dados de imagens digitais (Bill, 1999). No entanto, um processamento híbrido genuinamente integrado (isto é, sem conversão para um dos dois formatos) somente está disponível de forma incipiente. Isso também vale, na mesma medida, para a análise integrada de sensoriamento remoto e SIG. Observando-se as exigências de um sistema totalmente integrado, verifica-se que, até o momento, não ocorreu ainda uma atualização estrutural dos componentes de processamento necessários, que deveriam estar contidos neste sistema. As exigências são derivadas freqüentemente de determinados projetos, ou seja, de fontes de dados. Por isso, a integração de dados precisa ser substituída por uma *integração de análise*. As componentes necessárias para isso devem ser derivadas de uma taxonomia de operadores de alto nível, independentes de sistemas e dados, para um SIG e processamento de imagens independentes de sistemas e dados. Uma tal taxonomia, porém, está atualmente em seus primeiros passos (ver, a propósito, Albrecht, 1996; Tomlin, 1990; Ehlers, 2000 e 2006b).

## 2.6 Interpretação de Dados

### 2.6.1 Procedimentos baseados em *pixels*

Nos sensores multiespectrais "clássicos", certos procedimentos-padrão estão integrados para a interpretação em software operacional de processamento de imagens. Eles incluem desde procedimentos de correção radiométrica e geométrica (correção atmosférica e de distorções), filtragem de imagens e a aplicação de combinações de canais e razões de bandas (eliminação de sombras, índice de vegetação) até procedimentos matemático-estatísticos do mapeamento de uso do solo (classificação). A Fig. 2.2 mostra um procedimento típico de processamento de uma cena do Landsat para a obtenção de uma classificação de uso do solo. Na imagem pré-processada, são escolhidas áreas-teste representativas de classes de uso do solo, cujas

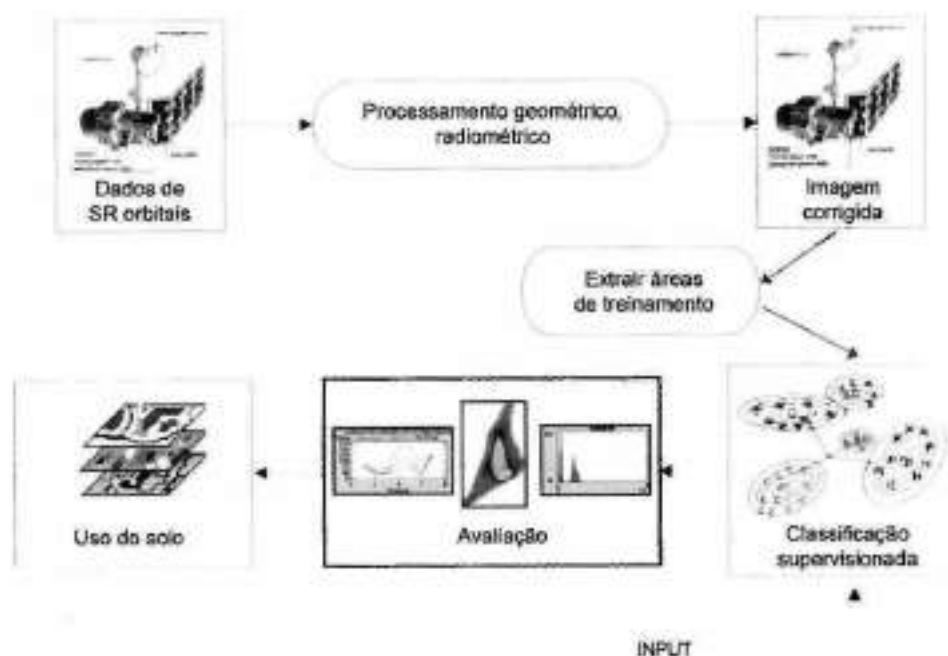


Fig. 2.2 Classificação multiespectral de dados do TM-Landsat  
Fonte: Michel, 2003

assinaturas espectrais servem como base para um algoritmo de classificação, fundamentado em métodos matemático-estatísticos. O procedimento de Máxima Verossimilhança é o mais frequentemente usado no sensoriamento remoto, o qual considera as correlações entre os canais espectrais.

A precisão geralmente é medida em áreas-teste independentes e representada sob a forma de uma matriz de confusão (Richards, 1986). Se bem que, numa análise rigorosa, este algoritmo se baseia na distribuição normal dos níveis de cinza (o que, na prática, frequentemente não ocorre), especialmente ao se incluírem mais informações no processo de classificação, obtém-se resultados bastante satisfatórios em tamanhos de *pixel* de 30 m e maiores.

Esses métodos, porém, não são mais aplicáveis quando a filtragem homogeneizadora dos níveis de cinza por meio de uma resolução relativamente grosseira não é mais assegurada. Esse é o caso quando o tamanho dos geoobjetos que deve ser detectado se encontra na faixa limítrofe do tamanho do *pixel* ou mesmo acima. Para os dados de sensoriamento remoto de alta e altíssima resolução, precisam ser usados outros procedimentos, que se baseiem numa regionalização ou segmentação inteligente dos dados de imagem e que utilizem procedimentos de base contextual.

## 2.6.2 Interpretação de dados de sensoriamento remoto de altíssima resolução

A interpretação de imagens dos novos sistemas sensores de altíssima resolução constitui uma área de pesquisa extremamente atual. Enquanto, em alguns casos, há recuos para uma

forointerpretação na tela como última possibilidade de trabalho, o desenvolvimento de procedimentos de interpretação automática representa um grande desafio para o sensoriamento remoto (Blaschke e Strobl, 2001).

No *workshop* "Sensoriamento Remoto e SIG" no âmbito da AGIT 2001, a extração automática de informações de dados de sensoriamento remoto de altíssima resolução constituiu um dos principais pontos enfocados nas apresentações (AGIT 2001). As metodologias apresentadas neste evento incluíram desde a integração de conjuntos de dados multissensores (por exemplo, Schiewe; Tuft; Ehlers, 2001; Zhang e Baltasvias, 2001 ou Hoffmann e Van der Wegt, 2001), a interpretação hierárquica, ou seja, a interpretação baseada em regras e apoiada em SIG (Bauer e Steinnocher, 2001; Möller et al., 2001) até o processamento e classificação de imagens orientados por segmentos (Batz e Schäpe, 2000; Hofmann, 2001). Deve-se, no entanto, lembrar que precisam ainda ser desenvolvidos métodos padronizados que possam utilizar o potencial dos sistemas sensores de altíssima resolução para novas aplicações operacionais (Fig. 2.3). Além disso, não é mais possível deixar de observar que uma elevada resolução espacial e novas técnicas

de registro podem levar a problemas que até hoje não tinham maior importância no sensoriamento remoto. Assim, por exemplo, os dados da base "geográfica" necessários para realizar a análise de imagens baseada em SIG nem sempre estão sem erros (Fig. 2.4). Por meio da técnica de registro *Stereo-Triplet*, da câmara HRSC-A, por exemplo, objetos temporários como veículos tornam-se um problema nas imagens (Fig. 2.5).

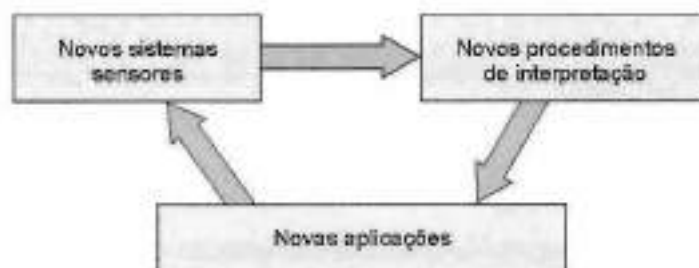


Fig. 2.3 Cadeia causal idealizada no desenvolvimento do sensoriamento remoto

Fig. 2.4 Falsos contornos de casas nos dados tracejados do mapa cadastral automático (ALK): forma errônea da casa (acima), casa não mais existente (abaixo, à esquerda), casa nova (abaixo, à direita). Dados do scanner HRSC-A (área-teste em Osnabrück, Alemanha)





**Fig. 2.5** Problemas devidos a objetos temporários na imagem digital Triplet-Stereo do HRSC-A: veículos estacionados considerados na obtenção de um modelo digital de terreno (MDT) (acima), erros de cores fictícias devido ao movimento do caminhão e dos diferentes ângulos de registro dos canais multiespectrais (abaixo)

## 2.7 Tendências

Os novos sistemas sensores da área de sensoriamento remoto estão penetrando em aplicações até agora "reservadas" às fotografias aéreas, como mapeamentos de biótopos com alta precisão, ou obtenção de informações de áreas urbanas. Até agora, as interpretações freqüentemente têm sido feitas por procedimentos *ad hoc*, que incluem interpretação multissensores, integração com SIG, métodos hierárquicos ou pré-processamento orientado a segmentos. Porém, é necessário o desenvolvimento de procedimentos padronizados, para que esses dados com potencial extremamente elevado sejam direcionados para aplicações operacionais. Esses procedimentos padronizados precisam permitir a integração de dados, métodos, sistemas, modelos, processos e do conhecimento e assim serem transferíveis e transparentes para o usuário de SIG. Devido ao rápido avanço dessa tecnologia e das possibilidades evidentes dos novos sistemas de sensoriamento remoto, espera-se que o desenvolvimento de procedimentos de interpretação automáticos concentre-se nos novos sensores.

## 2.8 Referências Bibliográficas

- ALBRECHT, J. *Universal analytical GIS operations*. PhD. Thesis, ISPA-Mitteilungen 23, Vechta, 1966.
- BAATZ, M.; SCHÄPE. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, XII*, Wichmann Heidelberg, Verlag, pp. 12-23, 2001.
- BAUER, T.; STEINNOCHER, K. Per parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique, *Geo-Informationssysteme*, 6/01, pp. 24-27, 2001.

- BILL, R. GIS-Produkte am Markt – Stand und Entwicklungstendenzen, *Zeitschrift für Vermessungswesen* 6, pp. 195-199, 1999.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS, *Geo-Information-Systeme*, 6/01, pp. 12-17, 2001.
- BRAND, M.J.D. *The european geographic information infrastructure*. Disponível em: <<http://www.frw.ruu.nl/eurogi/forum/esig.html>>, 1995.
- CURROUGH, P.; CRAGLIA, M.; MASSER, I.; SALGÉ, F. *Geographic information: the european dimension*. Disponível em: <<http://www.shel.ac.uk/academic/D-H/gis/policy.html>>, 1997.
- EHLERS, M. Integrating remote sensing and GIS for environmental monitoring and modeling: where are we? *Geo Info Systems*, pp. 36-43, Jul. 1995.
- EHLERS, M. Integrated GIS – From data integration to integrated analysis. *Surveying World*, v. 9, pp. 30-33, 2000.
- EHLERS, M. (Ed.). *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications and geology, Proceedings of SPIE*, v. 4545, Bellingham, 330 p., 2002.
- EHLERS, M. Remote sensing for GIS applications: New sensors and analysis methods. In: EHLERS, M.; KAUFMANN, H.J.; MICHEL, U. (Ed.) *Proceedings SPIE, Conference on remote sensing for environmental monitoring, GIS applications and geology III*, v. 5239, Bellingham, WA, pp. 1-13, 2004.
- EHLERS, M. Geoinformatik – Wissenschaftliche Disziplin oder alter Wein in neuen Schläuchen? – GIS – *Zeitschrift für Geoinformatik*, 2006a. No prelo.
- EHLERS, M. Integration taxonomy and uncertainty. In: MESEV, V. (Ed.) *Integration of Remote Sensing and GIS*. London: J. Wiley and Sons, 2006b. No prelo.
- EHLERS, M.; EDWARDS, G.; and BEDARD, Y. Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, n. 11 pp. 1619-1627, 1989.
- EHLERS, M.; JANOWSKY, R.; GÄHLER, M. New remote sensing concepts for environmental monitoring. In: EHLERS, M. (Ed.) *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications and geology, Proceedings of SPIE*, v. 4545, Bellingham, WA, pp. 1-12, 2002.
- EHLERS, M.; MÖLLER, M. Sehr hoch auflösende elektrooptische Satellitensensoren. Perspektiven zur angewandten Nutzung zukünftiger und bestehender Satellitenbildprodukte. In: EHLERS, M.; RHEIN, U. (Hrsg.), *Neue Fernerkundungsentwicklung in den Umweltwissenschaften*, ISPA Mitteilungen, Heft 28, pp. 19-35, 1997.
- HOFFMANN, A.; VAN DER WEGT, J. New sensor systems and new classification methods: laser- and digital camera-data meet object-oriented strategies, *Geo-Information-Systeme*, 6/01, pp. 18-23, 2001.
- HOFMANN, P. Detecting buildings and roads from Ikonos data using additional elevation information, *Geo-Information-Systeme*, 6/01, pp. 28-33, 2001.
- KONECNY, G.; LEHMANN, G. *Photogrammetrie*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1984.
- MÖLLER, M., EHLERS, M.; GÄHLER, M.; JANOWSKY, R. Automatisierte Biotoperfassung in den Uferandbereichen der Elbe im Zuge der Fahrrinnenanpassung 1999. In: WINDHORST, H.W. (Hrsg.) *Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten*, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographic und Regionalwissenschaft, Band 22, pp. 108-115, 2001.

- MÖLLER, M. *Urbanes Umweltmonitoring mit digitalen Flugzeugscannerdaten*. Wichmann Heidelberg: Verlag, 2003.
- REGINSTER, Y. *Cross programme action line: New geographical information society*. Disponível em: <<http://www2.echo.lu/gi/intro/gihome.html>>, 1999.
- RICHARDS, J.A. *Remote sensing digital image analysis*. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *Geo-Information-Systeme*, 6/01, pp. 34-39, 2001.
- SCHIEWE, J.; EHLERS, M. Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggestützter Fernerkundungssensoren. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG)*, 6/2004, pp. 463-474, 2004.
- STAR, J.L.; ESTES, J.E.; MCGWIRE, K.C. (Hg.). *Integration of remote sensing and GIS*. New York: Cambridge University Press, 1997. Disponível em: <[http://www.gis.leica-geosystems.com/products/files/ADS40\\_Software\\_Brochure.pdf](http://www.gis.leica-geosystems.com/products/files/ADS40_Software_Brochure.pdf)>
- TOMLIN, D. *GIS and Cartographic Modeling*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1990.
- ZHANG, Ch.; BALTSAVIAS, E. Improvement and updating of a cartographic road database by image analysis techniques using multiple knowledge sources and cues, AGIT 2001, *Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – Innovative Methoden, Workshop Abstracts*, Salzburg, pp. 25-26, 2001.

Páginas na Internet:

- |  |   |
|--|---|
| <a href="http://atsb-malaysia.com.my">http://atsb-malaysia.com.my</a>            | <a href="http://www.nspo.org.tw/2005e">http://www.nspo.org.tw/2005e</a>                   |
| <a href="http://www.digitalglobe.com">http://www.digitalglobe.com</a>            | <a href="http://www.qinetiq.com">http://www.qinetiq.com</a>                               |
| <a href="http://www.dlr.de">http://www.dlr.de</a>                                | <a href="http://www.satrece.com">http://www.satrece.com</a>                               |
| <a href="http://www.eoc.jaxa.jp">http://www.eoc.jaxa.jp</a>                      | <a href="http://smc.cnes.fr/PLEIADES/index.htm">http://smc.cnes.fr/PLEIADES/index.htm</a> |
| <a href="http://www.emergedss.com">www.emergedss.com</a>                         | <a href="http://www.space.eads.net">http://www.space.eads.net</a>                         |
| <a href="http://www.geoeye.com">http://www.geoeye.com</a>                        | <a href="http://spot5.cnes.fr">http://spot5.cnes.fr</a>                                   |
| <a href="http://www.gis.leica-geosystems.com/">www.gis.leica-geosystems.com/</a> | <a href="http://www.spotimage.fr">http://www.spotimage.fr</a>                             |
| <a href="http://www.imagesatintl.com">http://www.imagesatintl.com</a>            | <a href="http://www.sstd.rl.ac.uk">http://www.sstd.rl.ac.uk</a>                           |
| <a href="http://www.infoterra.co.uk">http://www.infoterra.co.uk</a>              | <a href="http://www.vexcel.com">www.vexcel.com</a>  |
| <a href="http://www.isro.org">http://www.isro.org</a>                            |   |

## **A Utilização do Conceito de Totalidade (Holismo) na Geração de Planos de Segmentação Regionalizados em Conjuntos de Imagens de Altíssima Resolução**

Stefan Lang

### **3.1 Importância de uma Representação em Multiescala e Multierarquia**

Em razão do aumento da resolução dos modernos sistemas de sensoriamento remoto, ou seja do desaparecimento do limite entre dados de sensoriamento remoto e as clássicas fotos aéreas, a escala da atividade humana e a sua interação alcançam cada vez mais os limites da resolução. Já que a experiência humana alcança progressivamente resoluções maiores, as áreas de aplicação potencial aumentam exponencialmente.

Grupos de objetos relevantes para a escala humana podem ser representados de forma cada vez mais diferenciada e precisa. Enquanto nas clássicas aplicações de "uso e cobertura do solo" da geração do Landsat-5 era possível discriminar apenas um pequeno número de classes, ou seja, em casos extremos havia somente classificações binárias. Atualmente, uma análise mais diferenciada, requer um aprofundamento temático, de onde resulta uma ramificação em forma de árvore, de esquemas de classificação freqüentemente hierárquicos. Esquemas desse tipo representam o fundamento de um modelo, de uma forma com organização empírica da realidade. Um exemplo disso é o esquema adotado para o Programa Corine (\*) que, em toda a União Européia, constitui uma unidade dividida em três níveis hierárquicos e que, caso de necessário, pode ser subdividido mais finamente e ajustado. A maior subdivisão e aprofundamento da árvore do objeto geralmente ocorre quando uma maior definição/diferenciação aparecer adequada ou relevante, ou ainda quando as características físicas espaciais exigirem classes mais específicas. Classificações de acordo com o esquema de Corine com uma escala final de 1:100.000 e considerando um limite inferior de área de 25 ha, podem ser efetuadas com base em dados de "alta" resolução (Ehlers neste volume, com relação ao deslocamento do conceito de alta resolução). Para a ampliação do esquema foram necessários até agora conjuntos de dados adicionais. Os modernos sensores de alta a altíssima resolução, por outro lado, estão em condições de fornecer dados de imagem que incluem esses níveis num só conjunto de dados e permitem um ajuste ao âmbito local como instrumento para o planejamento. A escala local do planejamento, a partir da qual são feitas declarações, não é ilimitadamente elevada – oscila entre 1:10.000 e 1:1.000 – de modo que o sonho do desenvolvimento prático já foi alcançado. A resolução máxima fornecida por uma cena do Ikonos reduz o limite areolar inferior dos 25 ha mencionados a menos de um centésimo deste valor, em paralelo (pelo menos em teoria!) com uma cobertura areolar de uma região.



Uma representação espacial-geométrica de grupos de objetos em diferentes níveis de resolução, satisfaz ao procedimento da segmentação em vários planos da análise de imagens do ponto de vista de conteúdo e estrutural, p. ex. a aproximação de multirresolução segundo Baatz e Schäpe (2000). Enfoques desse tipo mostram, do ponto de vista conceitual, fortes paralelos ao conceito de holismo. A presente contribuição tenta, considerando a aproximação analítica de sistemas complexos, aplicar na prática o conceito básico de holismo para a interpretação de dados de imagens.

## 3.2 Dupla Discretização como Princípio da Decomposição

### 3.2.1 Holonos e o paradigma de dinâmica da mancha hierárquica

Os sistemas são hierárquicos. Isso inicialmente pode parecer discriminatório e é bem possível que haja sistemas não hierárquicos, porém eles escapariam da nossa abordagem científica e de nossa compreensão – ou colocando de forma mais clara: interessamo-nos somente por sistemas hierárquicos, Allen e Starr (1982). A hierarquia, em contraponto ao princípio mecanicista, implica discriminar níveis distintos e elementos concretos de construção.

Ao observar e pesquisar sistemas complexos, a chave reside na identificação de componentes quase atômicos que os compõem, mas que estão presos a interfaces, de forma frouxa. A Teoria da Hierarquia assume que os sistemas, do ponto de vista temporal-espacial, possam ser quase que totalmente decompostos (*near decomposability*). Assim, sistemas ecológicos com sua imensa complexidade são considerados agregados construídos em forma de mosaicos, cujas estruturas temporal/espacial, são palpáveis, apesar de sua variabilidade. Para esses fundamentos sistêmicos unitários é usual a designação de “holon”, uma palavra criada da originária *holos* (em grego: totalidade) e *on* (em grego: parte) e que satisfaz à ambivalência de ser o total e ser uma parte. Tendências auto-afirmativas (*self-assertive*) garantem que um *holon* como tal pode ser acessado, sendo também a expressão dinâmica da totalidade do *holon*. Não se trata necessariamente de uma entidade ontológica, mas ao menos representa uma unidade de pesquisa epistemologicamente relevante. Em direção contrária, tendências integradoras criam uma combinação de *holons* em associação solta, que é construída hierarquicamente. Os *holons* em consequência estão amarrados numa estrutura vertical e horizontal, e assim sendo podem ser considerados como o produto de uma dupla discretização que se expressa na formação de superfícies. O relacionamento trançado de tais partes integrais na forma de uma árvore esgalhada (*outbranching tree*) hierarquizada, é consequentemente denominado *Holismo*, que expressa especialmente a estrutura em rede vertical/funcional. O caráter de cabeça de Janus de *Holons* está na dualidade entre a orientação para dentro e para fora.

Uma integração sintética dessa concepção com o conceito de mancha dinâmica (*dynamic patch*) desemboca no paradigma da dinâmica de mancha hierárquica (*hierarchical patch dynamics*), que neste momento desempenha um papel relevante na atual discussão da análise de estrutura da paisagem. Segundo Wu (1999), esse conceito representa uma potente ferramenta para aproximar-se com sucesso do problema da heterogeneidade espacial. Até o momento, as pesquisas de estruturas da paisagem com base em imagens, referem-se especialmente à disposição horizontal dessas unidades em forma de mosaicos de manchas (*patch mosaics*). As manchas não são estáticas e estão submetidas a mudanças temporais, de onde resulta um padrão temporalmente dinâmico (ou seja, que é reconhecido em cortes temporais). Na visão horizontal

(espacial clássica), a minimização de interdependências causais e iminentes ao sistema resulta na criação de limites, cuja manifestação é visível e por isso podem ser interpretados segundo a abordagem convencional. Em função disso, forma-se a heterogeneidade espacial que se baseia em unidades que parecem homogêneas. Numa visão ecológica-sistémica é importante ressaltar que um padrão desse tipo, do ponto de vista funcional, está associado rigorosamente com processos subjacentes e que os reflete de modo correspondente.

A manifestação espacial/temporal de processos e funções está associada a determinados domínios de escala que podem ser discretizados. A frequência dos processos em andamento é característica dos domínios da escala. As áreas de escalas não fluem continuamente umas nas outras, a transição ocorre em saltos, Wiens e Milne (1989). A escala indica aquele espaço de tempo ou extensão areolar, ao longo do qual um sinal permanece unitário. Ela designa aquela função que está em condições de descrever o contínuo entre planos e as suas interações. Estas áreas de escalas definem os limites no que diz respeito à dimensão vertical, Allen e Starr (1982).

### 3.2.2 Estruturas hierárquicas de objeto de imagem por meio de segmentação multiescala

A segmentação de imagens em multiescalas objetivando um sistema hierarquizado de objetos relacionados entre si, apresenta nítidos paralelos ao conceito de holismo. Lá como cá a característica essencial está numa discretização da informação altamente complexa em objetos elementares, os quais, num entrelaçamento de relações estruturadas de forma relativamente simples, formam, em diferentes planos, uma estrutura. Uma característica essencial de representações em multiescalas de uma área de estudos é a possibilidade de uma representação simultânea de vários planos (escalas, níveis) num sistema hierárquico de objetos de imagem (Fig. 3.1).

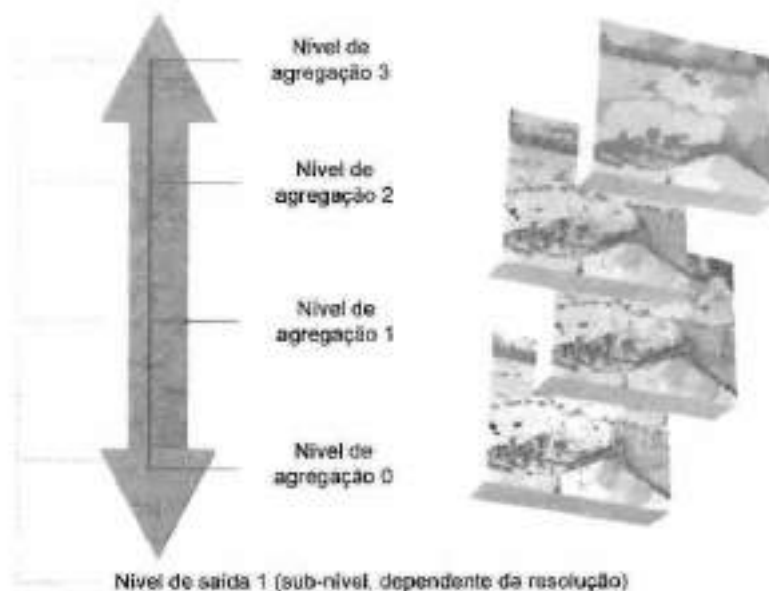


Fig. 3.1 Níveis de resolução, ou seja, de agregação ordenados hierarquicamente

A abordagem hierárquica da ramificação numa direção e a progressiva agregação na direção contrária, espelha não somente o processo humano de reconhecimento e percepção, mas também a sua adequação à construção estrutural do mundo real, conforme as colocações anteriores. A representação de vários planos de escala dentro de uma imagem pode ser revolucionária na área da análise de imagem, porém metodologicamente não se trata de nada novo e, do ponto de vista do conteúdo, é simplesmente necessária nas escalas atuais.

Num recorte de imagem ou numa cena, as unidades de paisagem a serem delimitadas horizontalmente são reconhecíveis com relativa facilidade e são normalmente claramente identificáveis quando apoiadas por software, especificamente por uma mudança brusca das características espectrais ou numa nítida mudança de certos parâmetros de forma. Afirmações sobre os domínios de escala são primeiramente regidos pela resolução, sendo que – como já mencionado – os graus de resolução atuais já alcançaram praticamente o nível relevante para o planejamento. A delimitação vertical em planos é dada previamente, por meio de um parâmetro de escala a ser especificado, o qual, em analogia aos domínios de escala, implica uma certa constância. A forma bem como o tamanho dos segmentos formados não mudam continuamente, porém em saltos, quando um nível de escala próximo for alcançado.

### 3.3 Hierarquias Regionalizadas

Uma representação hierárquica gerada matematica e heurísticamente não poderá corresponder inteiramente a uma diferenciação de planos conduzida empiricamente, de acordo com a concepção de holismo, permanecendo a pergunta do significado (*meaningfulness*) dos objetos formados. Assim, por exemplo, o processo de segmentação executado pelo software eCognition utiliza algoritmos (p. ex. abordagem da evolução de redes fractais, cf. Baatz e Schäpe, 2000) que não estão baseados em funcionalidade no sentido de um relacionamento sistêmico, porém, são definidos a partir da semântica da imagem (semelhança espectral de *pixels* em combinação com um critério de homogeneidade de forma). Ou seja, somente podem corresponder à realidade experimentada de modo limitado. Além disso, um parâmetro de escala, definido de modo relativamente rígido cuida para ter objetos do mesmo tamanho – conforme a parametrização – ou seja, similarmente compactados.

Analisando-se uma imagem no nível hierárquico  $x$  perceberemos sempre apenas alguns setores unitários como tendo sido otimamente segmentados; outros setores apatecerão como agregados fortes demais e outros ainda como excessivamente divididos. A exclusão de vários planos de segmentação unitários fixados em toda a área do recorte da imagem, parece ser muito generalizada para uma representação adequada. Uma classificação em várias escalas finais exige níveis de segmentação que estejam ajustados ao conteúdo da imagem e que em razão disso precisam ser gerados em diferentes setores da imagem e em profundidade variável. Tais planos de segmentação regionalizados podem ser considerados uma característica típica de diversos tipos de cobertura da terra ou de outras categorias a serem discriminadas, tal como a assinatura espectral ou a característica da forma. Tal característica se encontraria tipicamente numa hierarquia de segmentação em desenvolvimento, na forma de um conjunto de objetos verticais. Uma segmentação diferenciada regionalmente representaria neste caso uma forte aproximação a uma representação otimizada de características naturais.

Continua sendo um desafio para a pesquisa empírica testar a relevância de planos de escala legitimados, ou seja, verificar o seu significado para diversas disciplinas temáticas, como

por exemplo, por meio de pesquisas do comportamento das respostas de espécies animais ou por meio da comparação com mapas de vegetação disponíveis, baseados em pontos de vista de fisiologia vegetal e de outros métodos da realidade terrestre. O objetivo da pesquisa descrita no capítulo seguinte só pode ser a identificação de planos de segmentação relevantes para classes que se baseiam nos acessos metodológicos disponíveis e testar a sua condição de transferibilidade. Para tanto, assume-se que rupturas significativas no comportamento de segmentação forneçam indícios suficientes para uma mudança dos planos de escala.

### 3.4 Estudo de Caso da Região Montanhosa Rhön

A possibilidade de estabelecer hierarquias relevantes de classes, ou seja, de planos de segmentação, foi verificada por meio de um mosaico de fotografias aéreas coloridas infravermelho ortorectificadas, com uma resolução no solo de 0,78 m. Representa uma paisagem de montanhas do Rhön (Alemanha) com altitude média, dominada por pastagens, a qual, devido à mudança de uso do solo, experimenta um aumento do percentual de vegetação arbustiva. Assim, estruturalmente há três tipos de paisagens primárias a serem discriminadas: área verde intensivamente usada, ou seja, área para culturas (tipo *meadow*), área de pastagem com parcial incremento de arbustos (tipo *meadow*), e reflorestamento (tipo *floresta*), Fig. 3.2.

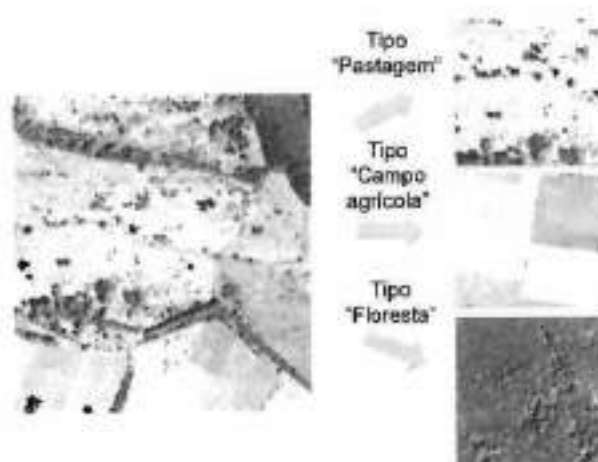


Fig. 3.2 Identificação de três tipos de cobertura do solo na área de estudo

#### 3.4.1 Tipificação por meio de segmentação incremental

Os três tipos de classes caracterizam-se por uma "variância interna" específica traduzida por meio de ocorrência de heterogeneidades. Áreas verdes e áreas agrícolas caracterizam-se, no que se refere ao caráter espectral, por uma homogeneidade relativamente elevada e diferenças do comportamento de reflexão ocorrem especialmente nas bordas de superfícies que estão sendo usadas. Ambas as formas de cobertura da terra diferenciam-se por suas características espectrais absolutas, porém, com relação à sua homogeneidade espectral devem ser consideradas semelhantes e por isso são resumidas no grupo *meadow*. Por outro lado, as áreas de reflorestamento e florestas

caracterizam-se por uma elevada heterogeneidade interna (elevado *speckle*), que no entanto possui distribuição igual (variância interna homogênea). O tipo pastagem pode ser considerado como uma forma mista, sendo a elevada homogeneidade espectral igualmente incomodada por "ruído" que se origina do aumento do grau de cobertura dos arbustos.

A partir de fotografias aéreas foram recortados 12 quadrados, como subconjuntos, com 250 m de lado (= 6,25 ha, ou seja,  $1,03 \times 10^5$  *pixels*, aproximadamente) que representam vários dos diferentes tipos em forma idealizada. Para derivar parâmetros de escala relevantes, posteriormente foi estudado o comportamento de agregação dos diferentes tipos de cobertura da terra, numa segmentação em diferentes planos. Isto foi realizado no software de análise de imagens eCognition, de modo parcialmente automático. O aumento incremental dos assim denominados "parâmetros de escala" (*scale parameters*) – um valor de medida para o tamanho médio dos objetos formados no procedimento de segmentação – foi protocolado e assim pôde ser aplicado aos diferentes subconjuntos como ordem em batelada (*batch*). Foram introduzidos, no total, 70 planos de segmentação em incrementos de 10. Para cada um desses planos foi calculado o número dos objetos formados bem como o tamanho médio dos objetos da imagem em *pixels*. O primeiro procedimento foi efetuado por protocolo manual, visto que eCognition (ao menos na versão 1.0) ainda não tem a opção de reescrever ou exportar tais estatísticas do procedimento de segmentação. O tamanho médio dos objetos foi obtido pela fórmula simples  $n_0/n_1$ , onde  $n_0$  = número dos objetos no "plano de *pixel*" (= número total de *pixels*) e  $n_1$  = número dos objetos gerados por plano de segmentação.

Do cálculo do número de objetos formados por passagem (tendendo à diminuição), resultam curvas características, visto que, devido à diferente homogeneidade espectral dos tipos de cobertura do solo, a divisão interna da escala também é diferente. Assume-se que o percurso das curvas seja característico para o respectivo tipo de cobertura do solo e que, por meio de um padrão específico em platôs e saltos, haja correspondentemente uma constância nas faixas de escala.

Foi pesquisada também a possibilidade de transferir os resultados obtidos para outros setores com o mesmo ou maior número de *pixels*. Numa possível condição de transformação das escalas relevantes obtidas, o processo de segmentação multicamadas poderia ser adicionalmente verificado, por meio de planos empiricamente confirmados.

### 3.4.2 Caracterização da possibilidade de transferência

A segmentação total é obtida para os diferentes tipos de cobertura do solo em diferentes parâmetros de escala  $PE$ ,  $PE_{max}$ . A Tab. 3.1 fornece o valor de  $PE_{max}$  médio para os três tipos de cobertura: *pastagem*, *campo agrícola*, e *floresta*.

Tab. 3.1 Valor médio  $PE_{max}$  (segmentação total) para os tipos de cobertura do solo

TIPO	SEGMENTO TOTAL
Pastagem	34
Campo agrícola	58
Floresta	21

A Fig. 3.3 mostra o percurso característico das curvas que resultam do número de objetos por passagem. Observando-se estas curvas, nota-se que em todas inicialmente há uma forte queda. Isso está relacionado à forte queda do número de objetos e explica-se pelo expressivo aumento do tamanho

dos objetos. O percurso da curva muda então, demonstrando um percurso típico para os diferentes tipos de cobertura *pastagem*, *campo agrícola* e *floresta*, sendo que *floresta* é identificada por uma queda geralmente forte e bastante homogênea da curva, onde interrupções da queda fornecem indicações da passagem entre floresta densa de coníferas e um estande mais aberto.

Devido à heterogeneidade interna unitária (planos do objeto: dosséis individuais, estande, todo um setor) obtém-se em tempo relativamente curto uma segmentação total. Após uma pequena queda (Fig. 3.3), a curva fica plana, relativamente rápida e ocorrem pequenos saltos porque o número de objetos antes da agregação, por exemplo limites de campos, é mantido relativamente constante. Uma "forma mista" é representada pelo percurso da curva do tipo *pastagem*, que apresenta uma nítida estrutura de matriz de mancha (*patch matrix*). A curva apresenta, em comparação com *campo agrícola*, saltos maiores e uma queda mais rápida.

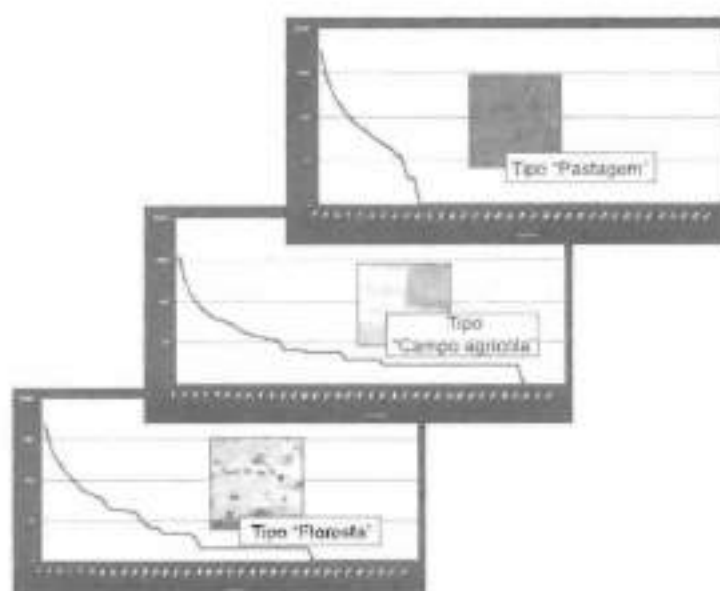
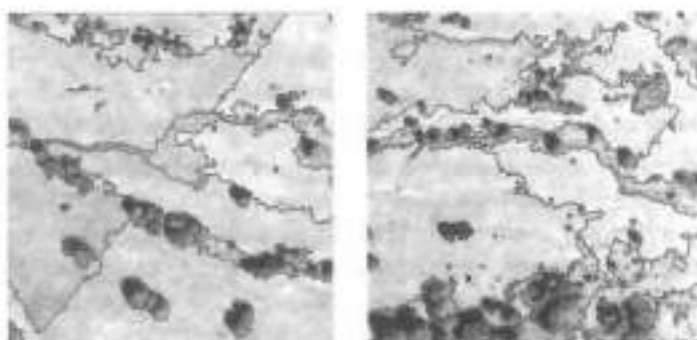


Fig. 3.3 Tamanho de objeto médio (ordenada) por passagem de segmentação (abscissa) para os tipos de cobertura do solo floresta, campo agrícola e pastagem

Por meio da caracterização específica de tipos dos percursos de curvas e baseado na análise de uma segmentação passo a passo, é possível a transmissão a outros setores da imagem, desde que esteja representado o mesmo tipo de cobertura do solo. Assim por exemplo o nível 140 do setor *part4* considerado, pode ser utilizado como amostra, para se introduzir em *part1* este nível de segmentação (Fig. 3.4).

### 3.5 Considerações Finais

A transmissão indicada e a aplicabilidade do conceito de *holismo* nos métodos de interpretação da análise de imagens, apóiam um contato mais direto com a inteligência imanente da imagem. A delimitação com sucesso de planos de segmentação limitados regionalmente e com



**Fig. 3.4** Segmentação direcionada por meio de transmissão de um nível de segmentação relevante (140) a um outro setor do mesmo tipo

tipos relevantes, pode ser utilizada para introduzir planos de segmentação direcionados e assim contornar uma estratégia do tipo tentativa e erro (*trial and error*). Por outro lado, precisa ser ressaltado que se trata de um nível prévio e que não pode substituir uma classificação, porque o estabelecimento de diferentes hierarquias numa cena de imagem heterogênea, atualmente não nos parece tecnicamente realizável. Não obstante, trata-se de uma importante contribuição para o potencial de entendimento avançado de imagem e dessa forma também para conhecer os processos subjacentes.

### 3.6 Referências Bibliográficas

- ALLAN, T. F. H.; STARR, T. B. *Hierarchy: perspectives of ecological complexity*. Chicago, 1982.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, Salzburg, pp. 12-23, 2000.
- BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP E.; STROBL J.; ZEIL P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/Remote Sensing environment for environmental applications. In: CREMERS, A.; GREVE, K. (Ed.) *Umweltinformation für Planung, Politik und Öffentlichkeit (Environmental Information for Planning, Politics and the Public)*. Metropolis Verlag, Marburg, v. 2, pp. 555-570, 2000.
- LANG, S. Multi-resolution representation of landscape structures utilizing object-based image interpretation. In: AGGER, P.; BITSCH, R. Studying multifunctional landscapes. *Landscape Ecological Papers*, n. 16, pp. 7-14, 2001.
- WIENS, J. A.; MILNE, B. T. Scaling of "landscapes" in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective. *Landscape Ecology*, v. 3, n. 2, pp. 87-96, 1989.
- WU, J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 25, pp. 367-380, 1999.

(\*) Corine – Programa da Comunidade Européia (Coordinated Information on the Environment) foi iniciado em 1985 para suprir a demanda de informações sobre as condições e o desenvolvimento do meio-ambiente europeu. A sua primeira fase terminou em 1990 e os resultados foram um sistema de informações, métodos e definições bem como acertos sobre trabalhos conjuntos de especialistas europeus que atualmente são componentes do GISCO, o SIG estatístico europeu. Os dados do programa Corine resultaram de interpretação manual de imagens de satélite em escala 1:100.000 (Nota do Tradutor).

## Design de Projeto Modular na Análise Orientada a Objetos

Roeland de Kok, Alfred Buck, Thomas Schneider e Ulrich Ammer

### Resumo

Ao se utilizarem métodos orientados a objetos na análise das imagens de dados de sensoriamento remoto, dispõe-se de uma grande quantidade de propriedades para a descrição das respectivas classes. Ao lado da opção de utilizar a informação espectral, estão incluídas também, em contraponto aos procedimentos clássicos baseados em *pixel*, propriedades de forma e textura bem como relações de vizinhança (contexto) na interpretação. É porém a associação com sistemas de informações geográficas que leva à análise orientada ao objeto adicionalmente a complexas descrições de classes, tornando necessárias novas estratégias de interpretação. A estruturação clara dos conjuntos de regras que são utilizados para a descrição de classes, torna-se possível pela introdução de uma estruturação modular de projetos. Um módulo constitui um plano de processamento fechado em si mesmo, composto de uma base de objetos de imagem que resultou de um processo de segmentação e de conhecimento de especialistas que formularam um conjunto de regras (válido somente aqui) utilizadas para a classificação. Mostra-se, a seguir, um exemplo de estruturação modular, com o uso de dados de sensoriamento remoto de altíssima resolução, a partir do seu uso operacional no Departamento de Administração Estadual de Florestas da Bavária, Alemanha, (projeto ALPS, 2000). O processamento de dados de sensoriamento remoto em vários módulos que agem paralela e separadamente entre si, permite uma diferenciação das regras espaciais e temporais, possibilitando uma configuração nítida de todo o conjunto de regras. Os passos isolados do processo de tomada de decisão para a classificação podem ser totalmente verificados e os resultados submetidos a uma validação, sendo que a influência e o efeito das regras isoladamente, permanecem reconhecíveis no resultado total.

### 4.1 Introdução

A análise de imagens baseada em objetos permite um uso bastante amplo de classes em diferentes grupos temáticos e uma faixa dinâmica de regras de decisão espectrais e espaciais. A enorme flexibilidade e a ampla paleta de feições pode tornar difícil um design de projeto para a análise de imagens. Isto vale especialmente quando a complexidade da imagem precisa ser integrada em um conjunto de passos de segmentação e classificação. A interação entre segmentação e classificação está relacionada a uma seqüência de delimitação e rotulagem de polígonos. Num SIG padrão, os processos de delimitação e rotulagem pertencem a um simples fluxograma de trabalho. Contrastando com isto, a análise automática de imagens num fluxograma orientado a objeto, requer uma seqüência equilibrada de processos de delimitação e



rotulagem, obtidos por meio de diferentes sessões de segmentação hierárquica e de classificação. Para permitir uma abordagem mais robusta para uma construção de projeto, este capítulo propõe o uso de um *design* modular na aplicação de regras espectrais e espaciais. A partir dos exemplos trabalhados no âmbito do Projeto ALPS (2000), é demonstrada a aplicação prática do conceito de "módulo". Uma caracterização mais detalhada de objetos espaciais do ambiente alpino foi obtida, permitindo fornecer resultados mais precisos aos tomadores de decisão da administração de florestas mencionada.

## 4.2 O Conceito de Módulo

Para a análise da geoinformação, muitos fatores de diferentes disciplinas são combinados dentro de uma análise específica da paisagem. Classes temáticas somente podem ser determinadas quando for usado um conjunto diferenciado de regras de classificação, incluindo desde uma simples análise espectral dentro de um pixel, até limites administrativos referentes à propriedade legal num polígono do SIG. O resultado final da análise é um conjunto de classes temáticas dentro de um quadro de mapeamento para assistir aos procedimentos de tomada de decisão. A análise da informação de imagem pode ser considerada como um conjunto de tarefas do trabalho. Como exemplo, os efeitos de iluminação ou distorções geométricas causadas em razão da topologia numa imagem de satélite, podem ser analisados usando um MDT. Tais passos do processo podem ser efetuados independentemente de outras tarefas, já que dependem de fatores físicos de altimetria do terreno e posição do sol, da projeção escolhida e das características do sistema sensor.

A fase de preparo do design de um projeto complexo pode ser determinada por uma diferenciação das tarefas do projeto. Aqui o projeto completo é diferenciado numa cadeia hierárquica de módulos. Com relação à definição de módulo, este estudo baseia-se na terminologia conforme descrita por Rumbaugh et al. (1991):

- i) Um *módulo* é uma construção lógica para o agrupamento de classes, associações e generalizações.
- ii) Um *módulo* captura uma perspectiva da situação. Um modelo de objeto consiste de um ou mais módulos.
- iii) *Módulos* permitem a partição de uma cadeia de avaliação baseada em modelos de objetos em partes gerenciáveis.

Para o ambiente específico de sensoriamento remoto (SR) e SIG, uma análise orientada ao objeto fornece uma sinergia de amplo alcance com o SIG e SR. Definições de classe dentro de análises orientadas ao objeto, dependem de um conjunto de regras diferenciadas de SIG e SR. Esse complexo conjunto de regras de classificação (sistema especialista) incorpora problemas de procedimentos de visão de conjunto e de validação, porque um amplo conjunto de regras impossibilita ou dificulta uma clara visão de conjunto da função e os efeitos de cada uma dessas regras. A diferenciação de regras permite a visão clara de conjunto e a validação dos procedimentos. Para tanto a definição do módulo deverá ser adaptada para o uso dentro da análise orientada ao objeto. Nessa adaptação, um módulo deve incluir (Fig. 4.1):

- uma camada segmentada;
- o *layout* da classe em potencial;
- as regras de questionamento para cada classe.

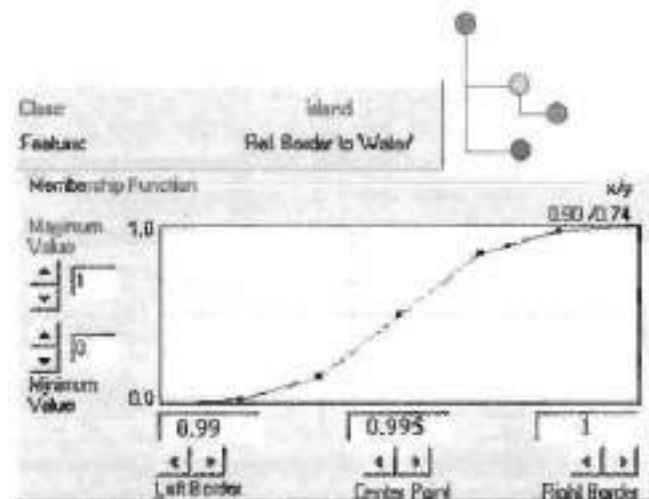


Fig. 4.1 Na camada segmentada 2, a classe "ilha" foi posicionada como uma subclasse de "Terra" e questionada por meio da vizinhança e limite relativo à água.

O módulo permite regular a seqüência de classificação. Para cada módulo, alguma forma de conhecimento especializado pode ser aplicada. A incorporação deste conhecimento especializado na análise de imagem, requer um *modelo de paisagem* pré-definido. Tal modelo inclui informações sobre todos os processos subjacentes à dinâmica da paisagem, tais como erosão, degradação, sucessão, envelhecimento de estandes de florestas e outras forças. Esses processos podem ser conectados apenas indiretamente à informação de imagem, que é como uma foto instantânea num sistema dinâmico. Um exemplo típico é a quantidade de dosséis de árvores unicárias num espaço relativamente aberto. Com ajuda do *modelo de paisagem*, o registro desses dosséis de árvores permite um julgamento do grau de sucessão ao começar com a fase de paisagem aberta ou de degradação, no caso de cobertura de floresta inicial, estressada devido ao excessivo pastoreio. Um módulo típico em tal caso forneceria uma camada classificada com medições de distância entre os sub-objetos do dossel de árvore, dentro de um polígono pré-definido. Um outro módulo supriria a máscara da floresta e/ou os primitivos do objeto referentes a cada dossel de árvore.

Para uma análise orientada ao objeto, cada módulo é construído sobre a sua própria sessão de segmentação. Assim sendo, para  $n$  módulos,  $n$  sessões de segmentação são requeridas.

#### 4.2.1 Módulo no ambiente de software eCognition

O fluxograma bem como o design do projeto foram conduzidos dentro da concepção geral e pelas ferramentas oferecidas pela versão *b* do pacote de software eCognition 1.0 (Bartz et al., 2000). Para evitar interpretações errôneas, as seguintes definições e descrições de processo foram introduzidas.

- Uma *camada (layer)* é uma portadora de informação bi-dimensional, na maior parte do tempo é um simples mapa de bits, tal como uma banda espectral do Landsat com 256 níveis de

cinza ou um mapa SIG digital temático, tal como um mapa geológico com pontos e polígonos, incluindo um arquivo com a base de dados.

- Um *nível (level)* é o produto de uma sessão de segmentação que cria um conjunto de objetos de imagem relacionados a uma base de dados e que cobre toda a área do conjunto de camadas de entrada. A imagem/objetos no nível mantêm a sua relação com os seus (sub)objetos hierárquicos. Um nível por isso possui *sempre* um número hierárquico.

- Um *módulo* em eCognition é o conjunto de todos os objetos de imagem num simples nível, junto com o conjunto de regras de decisão por classe para este nível.

- Um *projeto* em eCognition é o conjunto completo de todos os módulos dentro de um simples quadro hierárquico.

- Uma *sessão de segmentação* cria a base de dados com objetos espaciais únicos e seus atributos.

- Uma *sessão de classificação* é um *questionamento* a essa base de dados de acordo com um conjunto seletivo de atributos e segue regras de decisão previamente definidas.

Um processo de análise com o eCognition é uma seqüência de segmentações e classificações aplicadas em diferentes camadas com ajustes de segmentação adaptados e regras de decisão. Uma sessão de segmentação requer o registro de todos os objetos espaciais a partir de uma camada, segmentada num simples nível hierárquico. A fase de classificação torna-se mais como uma seleção ou procedimento de extração do objeto. Normalmente a extração de objetos é um procedimento típico dentro de um questionamento da base de dados. A classificação num nível específico não requer necessariamente a classificação de todos os objetos. (Observe a diferença em relação à classificação de imagem baseada em *pixels*, onde cada *pixel* numa camada recebe um rótulo).

#### 4.2.2 Design de um módulo para um caso de teste em mapeamento florestal

Num projeto de mapeamento de florestas alpinas (Buck, 2001; de Kok, 2001) foi efetuada uma combinação de camadas de SIG com imagens em múltiplas escalas. De acordo com a definição anterior de "módulo", o fluxograma do projeto ALPS foi dividido nos módulos mostrados na Fig. 4.2. Resultados da análise de SIG neste capítulo foram usados somente como entrada à análise de imagens. Esse trabalho se concentra nos módulos desenvolvidos para a análise orientada ao objeto de dados de sensoriamento remoto que, no conceito básico, são a fonte de atualização de bases de dados de SIG.

O projeto é definido por meio de um módulo principal de SIG e SR (vide Fig. 4.2). O módulo principal de análise de imagens avalia os dados de sensoriamento remoto pré-processados (módulo de pré-processamento de sensoriamento remoto). Para criar o nível básico do fluxograma de trabalho do módulo principal de análise de imagens, foi aplicada a segmentação ao pacote de dados que contém seis camadas, a saber: a ortofoto, quatro bandas do SPOT 4, bem como o NDVI derivado das bandas do SPOT 4. Os parâmetros de segmentação (escala, cor, forma, etc.) foram escolhidos para permitir o registro de uma mancha na floresta de 0,5 ha como o menor polígono independente. Para isso, os fatores de ponderação foram ajustados a 1 na banda da ortofoto pancromática, para 0,2 nas quatro bandas multiespectrais do SPOT 4 e para 0,5 na camada NDVI. O nível resultante foi então copiado duas vezes (vide Fig. 4.2 dentro da linha pontilhada).

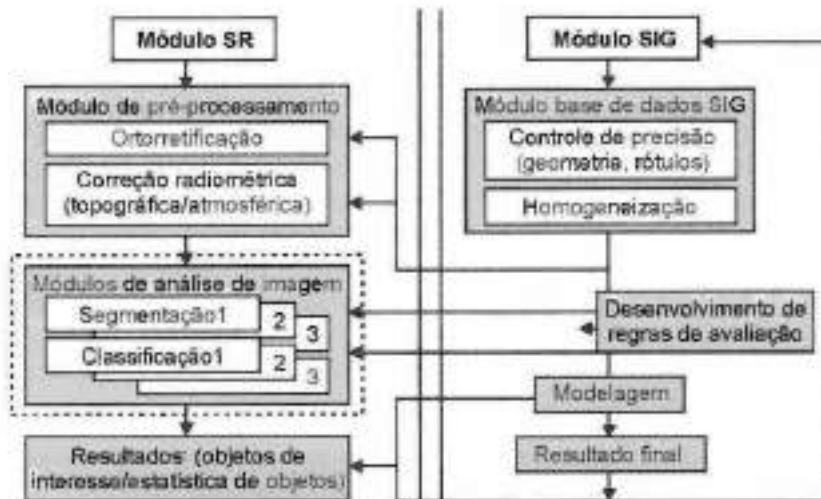


Fig. 4.2 Módulos principais e fluxo de informações da cadeia de avaliação do Projeto ALPS. Este paper refere-se aos módulos desenvolvidos para a análise orientada a objeto de dados de sensoriamento remoto (linha pontilhada)

Um sub-módulo de análise de imagem (AI) consiste portanto do nível segmentado e de um conjunto de regras desenvolvidas com o enfoque na avaliação de uma propriedade específica. A estrutura modular do fluxo de trabalho permite o manuseio independente, seqüencial ou paralelo das diferentes tarefas. O conjunto de regras é válido somente dentro de cada módulo.

Três sub-módulos AI devem ser mais detalhadamente discutidos (linha pontilhada da Fig. 4.2), a saber:

**Módulo AI 1:** plano básico com dados originais do objeto, usados para a classificação de imagens multiespectrais.

**Módulo AI 2:** plano básico (central) usados com dados SIG para posterior análise.

**Módulo AI 3:** plano que é usado para armazenar e analisar todos os objetos não classificados.

No **Módulo AI 1** referido, somente feições espectrais e características texturais derivadas são usadas para a classificação espectral de imagem.

No **Módulo AI 2**, a classificação dos segmentos é melhorada, ponderando-se a informação espectral e textural com os resultados do módulo principal da análise de SIG. O conjunto de regras de avaliação do módulo principal do SIG analisa a camada de informação sobre a composição das árvores da floresta e das condições do estande (base de dados do gerenciamento da floresta), incorporando adicionalmente conhecimento especializado sobre condições micro-climáticas como p. ex. as faixas sob influência do vento quente "Föhn", ou bordas climáticas controladas por altitude, limitando ou excluindo a existência de tipos de árvores ou vegetação. A totalidade das regras desse módulo estabelece a base de conhecimentos que define o modelo de paisagem, o que permite derivar a expectativa *a priori* sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de cobertura do solo usada para ponderar a informação espectral e textural de avaliações de dados

de sensoriamento remoto, conforme resultou do módulo AI 1 anterior. Isto é feito com a ajuda de funções de pertinência (*membership functions*) de lógica *fuzzy* do procedimento de avaliação do eCognition.

Os erros na cadeia de avaliação de ambos os módulos podem ser detectados por uma verificação de plausibilidade, conforme mostrado na Fig. 4.3. As classes de cobertura do solo resultantes do módulo AI 1 (vide Fig. 4.3, lado esquerdo) foram comparadas com os resultados do módulo AI 2. A linha limítrofe dos objetos de interesse classificados diferentemente foi sobreposta à imagem composta usada para a segmentação. A classificação errônea pode ser imediatamente detectada visualmente. Ao explorar a base de dados, um simples questionamento sobre a probabilidade da existência de árvores de folhas largas (*broadleaf*) na respectiva altitude dará o mesmo resultado.

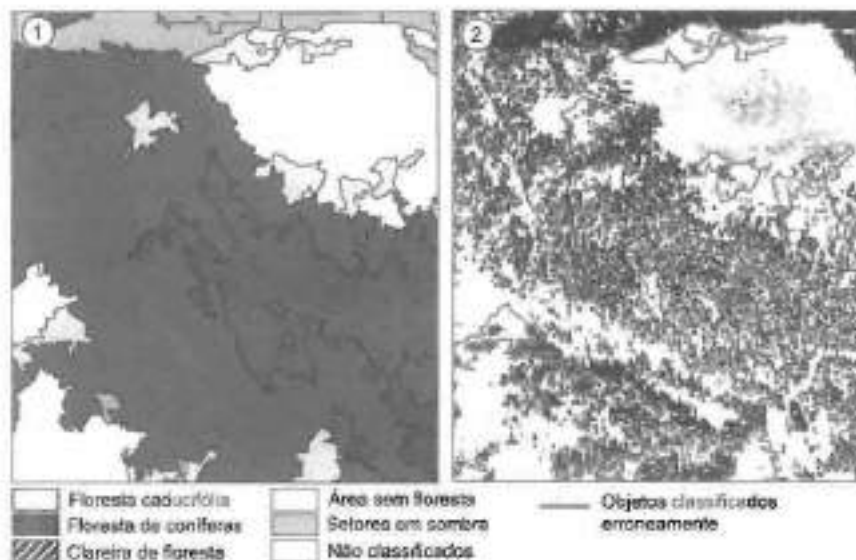


Fig. 4.3 Exemplo do estudo de verificação de plausibilidade, apresentando classes de cobertura da terra que resultaram do módulo AI 1 – lado esquerdo (1), e a composição da imagem usada para segmentação sobreposta à linha do limite de objetos de interesse classificados de modo diferente no módulo AI 2 (à direita 2). Visualmente, a classificação errônea pode ser imediatamente detectada e identificada como erro de confusão espectral

Trabalhando com descrições complexas de classes tais como nesse estudo, onde a identificação e caracterização de classes é o resultado de um processo de múltiplos passos, um *design* modular aumenta a transparência das avaliações e facilita a adaptação de ajustes e regras que não obtêm os resultados esperados. Adicionalmente, cada passo do procedimento pode ser traçado de volta separadamente. O conceito modular, conforme desenvolvido neste estudo, ajusta-se muito bem a exigências de conjuntos de regras em sistemas especialistas, que devem ser concisas e claramente estruturadas, tornando as decisões compreensíveis e os resultados reproduzíveis (Buck, 2001).

### 4.2.3 Módulo A1 3 objetos não classificados

Este módulo realça uma habilidade muito poderosa da abordagem da análise de imagem orientada ao objeto. Para melhorar a classificação espectral, precisa haver um enfoque naqueles objetos que possuem um elevado valor de pertinência dentro de sua classe. Quanto mais restritas forem as condições que definem uma pertinência de classe, tanto mais objetos não classificados ocorrerão. Abordagens de análise de imagens baseadas em *pixels* tenderão evitar esta situação, estendendo as definições de classe. Os *pixels* que ainda não estão casando perfeitamente com a definição de classe, são alocados a uma classe usando métodos tais como *máxima verossimilhança* ou *vizinho mais próximo*. A abordagem orientada a objeto, oferece soluções bem melhores. A segmentação adequada já fornece uma base de dados com uma descrição muito detalhada de objetos de interesse. Por meio de um refinamento dos questionamentos da base de dados, descrições de classe superiores e muito detalhadas são possíveis, apresentando também classes problemáticas. Além disso, a localização de cada objeto pertencente a uma classe é conhecida, permitindo, na prática, avaliar cada objeto separadamente.

O primeiro passo no nosso exemplo foi discriminar entre objetos "não classificados" e "fáceis de classificar". Transportá-los a um novo módulo (Módulo A1 3), permite o desenvolvimento de novas regras, com influência mais forte das características espaciais como, vertente, aspecto de altitude e índices espectrais tais como as razões NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação Diferencial Normalizado). Na Fig. 4.4 é apresentado o anaglifo com uma área selecionada de objetos não classificados na Fig. 4.5. Inicialmente é feita uma análise no atributo NDVI, em três classes. Os objetos selecionados da Fig. 4.5, funcionam como uma base para o posterior desenvolvimento de um sistema especialista. A localização e a distribuição espacial desses objetos de interesse podem ser integradas tanto numa análise de erosão como numa visão de conjunto da degradação florestal. Isto dependerá do posterior desenvolvimento das preferências do usuário de como tais produtos serão integrados. A Fig. 4.5 também mostra como uma abordagem baseada em classe pode ser combinada com uma abordagem baseada



Fig. 4.4 Anaglifo derivado de imagens do IRS-C 1997 e SPOT-4 1999. Área de 8 x 8 km

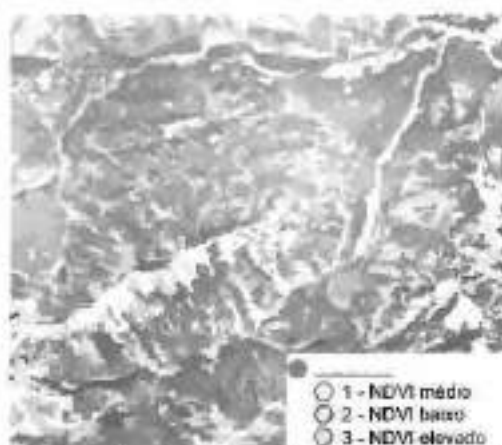


Fig. 4.5 A mesma área do encarte da Fig. 4.4. Objetos não classificados de interesse do módulo 1 foram transferidos para o módulo 3. Foram classificados apenas de acordo com valores NDVI da vegetação. Cinza significa classificados no módulo 1

em objeto (Atkinson, 1999). O mapa temático na Fig. 4.5 mostra uma simples legenda que trata de um conjunto selecionado de objetos de imagem. Ele somente é válido para este módulo e não cobre todo o mapa temático. É claro que os objetos de imagem em cinza também possuem valores de NDVI elevados ou baixos, porém eles não serão revisados neste módulo.

A abordagem descrita, é de alto interesse para estudos temáticos sobre estimativas de erosão ou de riscos de avalanche. Tais estudos podem usar diretamente a informação fornecida para finalidades de modelagem, melhorando a precisão das previsões necessárias para tomadas de decisão sobre a necessidade de medidas.

### 4.3 Observações Finais

O sinergia de SR e SIG na análise baseada em objetos permite que problemas complexos sejam enfrentados. A classificação de dados, contendo uma enorme quantidade de feições características, bem além da análise espectral apenas, tornou-se possível pela análise de imagens baseada em objetos. As novas conseqüências problemáticas são a visão de conjunto da interação de regras de classificação e a habilidade para que o projeto complexo total seja validado. A construção hierárquica conduz a uma abordagem passo a passo, na qual a diferenciação de um projeto em "módulos" é sugerida, para manter o passo com a complexidade e manter uma visão simples de conjunto da análise completa. A sinergia entre SR e SIG combinada com uma resolução muito elevada, permite a extensão de classes potenciais numa legenda para além de valores clássicos, alcançando de 20 a 50 classes de legenda, em sub-objetos temáticos de imagem que alcançam de 200 a 1.000 classes-objeto. A abordagem baseada em classes de SIG padrão e em cartografia tradicional não estão contradizendo diretamente a abordagem orientada ao objeto, conforme descrito por Hinton (1999) e Atkinson (1999). Pode-se obter uma combinação, limitando-se a quantidade de classes dentro de um simples módulo.

Uma construção modular permite um preparo adequado e uma fase de avaliação de um projeto de análise de imagens usando objetos de imagem. A separação de tarefas tornaria possível descrever expectativas detalhadas de entrada e saída de cada módulo. Isso implementa uma construção de um cenário que também permitiria a simulação de resultados intermediários como testes experimentais para alguns módulos, dentro do projeto completo.

### 4.4 Referências Bibliográficas

- ALPS Inventur und Beobachtung der Schutzwälder in alpinen Regionen Nutzungsmöglichkeiten hochauflösender Satellitendaten in der Bayerischen Staatsforschungsverwaltung, MOMS-Pilotprojekt ALPS, gefördert durch das DLR (FKZ 50EE9610) und der Bayerischen Staatsforstverwaltung (FKZ V43). Relatório final de projeto (inédito), 2000.
- ATKINSON, P. M.; NICHOLAS, J. T. (Ed.) *Advances in remote sensing and GIS analysis*. Chichester: Wiley and Sons, 1999.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. *Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. AGIT-Symposium 2000, Wichmann Verlag Heidelberg, pp. 12-23, 2000. ISBN 3-87907-349-X.
- BUCK, A.; KOK, R.; SCHNEIDER, Th.; AMMER, U. Improvement of a forest GIS by integration of remote sensing data for the observation and inventory of "protective forests"

- in the Bavarian Alps. In: *Proceedings of IUFRO Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring*, Rogow, Poland, 1-3.06.1999.
- BUCK, A. *Aufbau, Optimierung und Anwendung eines forstlichen Geo- Informationssystems im Gebiet der Bayerischen Alpen – Implementierung eines wissensbasierten Systems zur Integration von Fernerkundung und GIS*. Dissertation an der TU München, 2001.
- HINTON, J. C. Image classification and analysis using integrated GIS. In: ATKINSON, P. M.; NICHOLAS, J. T. (Ed.) *Advances in remote sensing and GIS analysis*. Chichester: Wiley and Sons, 1999.
- de KOK, R.; SCHNEIDER, T.; BAATZ, M.; AMMER, U. *Object based image analysis of high resolution data in the alpine forest area*. Joint WSF ISPRS WG I;1 I 3 and IV 4 SENSORS AND MAPPING FROM SPACE 1999, Hannover, 27-30.09.1999.
- de KOK, R. *Objektorientierte Bildanalyse – Ein Lösungsansatz für den automatisierten Einsatz sehr hoch auflösender Satellitendaten für forstliche Fragestellungen*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der TU München, 2001.
- RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLAN I, W.; EDDY, E.; LORENSEN, W. *Object-oriented modeling and design*. Gen. Elect. R&D Centre Schenectady. New York: Prentice-Hall International Inc., 1991.
- SCHNEIDER, Th.; AMMER, U. Concept and first results of a remote sensing based monitoring system for the Bavarian Alps. In: *Proceedings of International Workshop Research and Monitoring as Key Elements for Sustainable Development in the Limestone Alps*, Bled, Slovenia, Austrian Network for Environmental Research, 11-13.10.98. ISBN 3-00-004079-X.
- SCHNEIDER, Th.; de KOK, R.; BUCK, A.; AMMER, U. Monitoring des Schutzwaldes im Alpenraum – bringt der objektorientierte Ansatz den Durchbruch? In: *Proceedings Application of Remote Sensing in Forestry*, Zvolen, pp. 73-83, 12-14.09.2000. ISBN 80- 968494-0-9.



## O Potencial de Procedimentos Baseados em Regiões para a Avaliação Integrada de Dados de SIG e Sensoriamento Remoto

Jochen Schiewe e Lars Tufte

### 5.1 Introdução

SR e SIG podem ser complementares em muitos aspectos. De modo geral, deve-se mencionar aqui a utilização recíproca de dados e métodos, especialmente na modelagem e análise ambiental (Wilkinson, 1996). Com a disponibilidade de dados de sensores tanto aerotransportados como orbitais, a importância do SR é ainda maior. Em função de melhoria da resolução espacial e, em parte, também da resolução temporal, resultam novas ou aprimoradas opções de aplicações em muitos setores (Jensen e Cowen, 1999, para áreas urbanas). A disponibilidade cada vez maior de dados de SIG também abre novas opções e potenciais para a avaliação de dados de SR. Porém, para otimizar as possibilidades destas tecnologias, há necessidade de uma integração total (Ehlers et al., 1989), que ainda não foi alcançada.

A aceitação por parte do usuário de dados de sensores remotos, existentes e futuros de alta e altíssima resolução, está fortemente relacionada com a qualidade dos métodos de interpretação correspondentes. Neste contexto observou-se que, em função de uma melhoria da resolução espacial, pode haver um aumento da variabilidade interna, ou seja do ruído dentro de classes de uso do solo. O resultado demonstra que os procedimentos multiespectrais convencionais têm fornecido uma precisão de classificação baixa demais. Para a solução deste problema há alguns procedimentos alternativos, que serão mencionados sucintamente no item 5.2 deste artigo. Será dada uma atenção especial a um procedimento baseado em regiões, que executa uma segmentação da imagem antes da classificação propriamente dita.

Em nossos estudos, a segmentação e a integração de dados de SIG, visando melhorar a segmentação, estão em primeiro plano. Para isto discute-se tanto o potencial como também a problemática da segmentação do ponto de vista teórico e prático. O item 5.3 deste trabalho fornece uma visão de conjunto crítica sobre os procedimentos de segmentação existentes e as suas possibilidades de aplicação no SR. As nossas pesquisas empíricas têm como objetivo uma melhoria e operacionalização da segmentação através do uso de dados de SR e SIG, por um lado para classificações de uso do solo e por outro para a atualização de dados de SIG (item 5.4). Com base nesta experiência, são discutidas outras tarefas de pesquisa e de desenvolvimento (item 5.5).

### 5.2 A Necessidade de Análises Baseadas em Regiões

Através da resolução espacial mais elevada dos novos sensores, o problema dos *pixels* mistos é reduzido e por outro lado são ampliados a variância interna e o ruído dentro de

classes de uso da terra. Por isso, procedimentos convencionais de classificação multiespectral (p. ex. Máxima Verossimilhança), cujas composições de *clusters* se baseiam em homogeneidades espectrais, resultam em excessos de classes, ou seja em classes mal-definidas (Casluvie, 1987). Um exemplo disso é apresentado na Fig. 5.1.

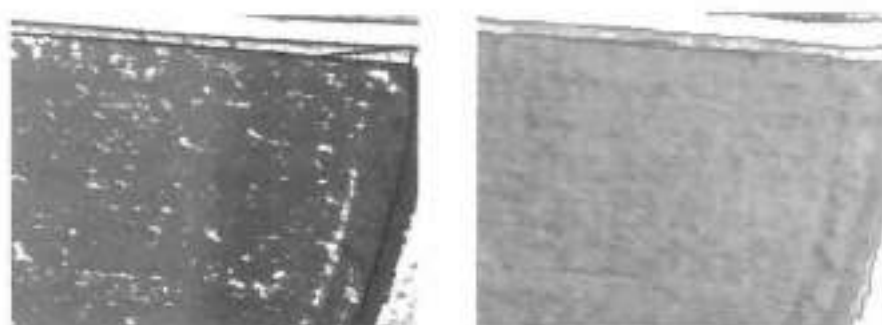


Fig. 5.1 Comparação do resultado de uma classificação por Máxima Verossimilhança (à esquerda) com o resultado homogêneo e mais realista de uma segmentação (à direita) (tamanho da área – 80 x 80 m<sup>2</sup>)

Como procedimentos de solução alternativa, podem ser usados métodos de classificação por área (*per field classification*). Assim são usados dados SIG já utilizados para dados com pequena até média resolução espacial destinados à melhoria da classificação (p. ex. por Janssen e Molenaar 1995; Lobo et al., 1996, Harris e Ventura, 1995). Pesquisas realizadas na Universidade de Southampton (Reino Unido) com dados de resolução média (4 m) mostraram certas melhorias qualitativas no que se refere à precisão e à capacidade de interpretação (Aplin et al., 1999), enquanto os resultados com dados de altíssima resolução não foram satisfatórios (p. ex. Hoffmann et al. 2000a, para dados com tamanho do *pixel* no solo de 15 cm).

Os resultados não satisfatórios das tradicionais e alternativas concepções de solução, desembocaram na aplicação de procedimentos baseados em regiões. Para tanto foram usados procedimentos de segmentação que devem ser entendidos como o primeiro passo para a classificação propriamente dita (vide seqüência da interpretação na Fig. 5.2). Enquanto algoritmos tradicionais, multiespectrais, consideram exclusivamente semelhanças espectrais, independentemente de suas ocorrências locais, as concepções de segmentação partem da hipótese de que elementos de imagem vizinhos pertencem à mesma classe. Esta declaração é confirmada, ou rejeitada, baseada em parâmetros de homogeneidade ou heterogeneidade. Os procedimentos correspondentes para isto, podem trabalhar com base em pontos, bordas ou regiões. Uma visão de conjunto sobre isto é fornecida p. ex. por Haralick e Shapiro (1985, 1992) ou Jähne (1997). A segmentação pode ser executada em diferentes planos de escala, para poder considerar a resolução otimizada dos objetos que variam em tamanho, forma e disposição. Obtêm-se setores concordantes (*segments*), que ainda não têm um significado real. Este relacionamento precisa ser obtido posteriormente, durante a etapa da classificação, através da introdução de conhecimentos adicionais.

Após a segmentação, a classificação é feita através de conhecimentos adicionais, por exemplo, um catálogo de objetos relacionados à aplicação. Em função das diferentes informações

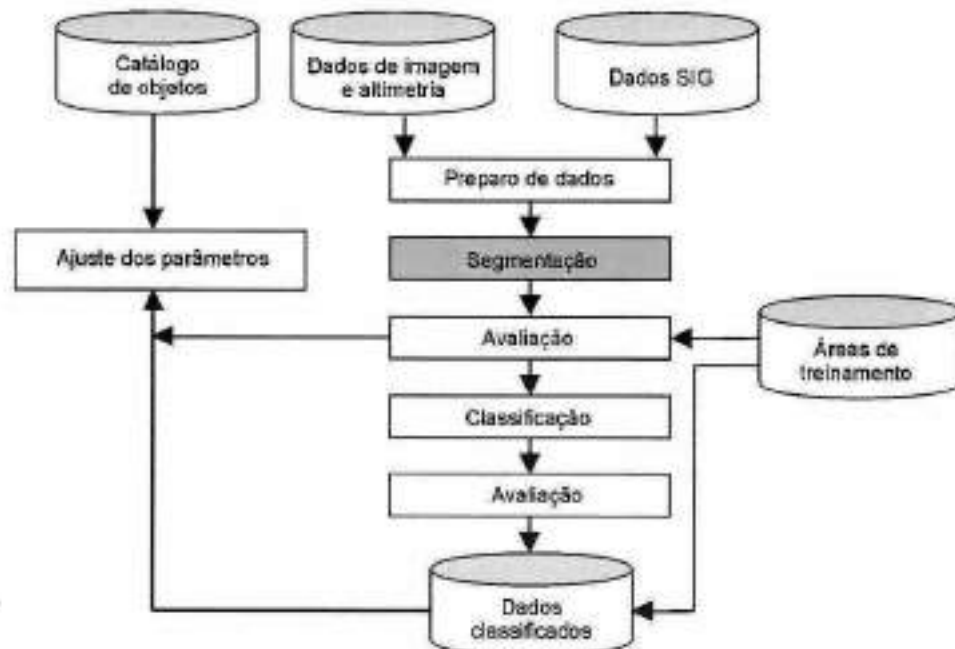


Fig. 5.2 Fluxograma geral de uma análise de dados de SR baseada em regiões

de várias fontes de dados, a concepção de lógica *fuzzy* é uma importante opção como técnica de classificação. Aqui é efetuada uma associação das características de dados observados (p. ex. textura espectral, tamanho da área, altura do objeto, objetos vizinhos) com as classes apresentadas no catálogo de objetos, através da definição de funções de pertinência (*membership functions*) e de regras.

### 5.3 Algoritmos de Segmentação no Sensoriamento Remoto

Já existem diversos procedimentos de segmentação, que foram desenvolvidos e aplicados em diferentes áreas. A título de exemplo, mencionamos as seguintes disciplinas de aplicação:

- Medicina (p. ex. Handels, 2000; Horsch e Lehmann, 2000);
- Neuro-informática para a análise de cenas dinâmicas (p. ex. Handmann et al., 1998, 1999; Seelen et al., 1997) ou
- Telecomunicações (Gustaffson, 1997; Wesfreid e Wickerhauser, 1999).

De mesmo modo, fica claro que os pacotes de software disponíveis para finalidades de segmentação se originaram desta disciplina ou de disciplinas similares, por exemplo, os sistemas – geralmente desenvolvidos em universidades – ARIES (University of Washington, Department of Electrical Engineering, <http://icsl.ee.washington.edu/~cabralje/papers/thesis/>), NIH Image (U.S. National Institute for Health; <http://rsb.info.nih.gov/nih-image/about.html>) ou DIAS (Universität Jena, Lehrstuhl Digitale Bildverarbeitung; <http://pandora.inf.uni-jena.de/p/d/software.html>).

Observando-se estes pacotes com maior cuidado, verifica-se que os respectivos desenvolvimentos são muito especiais e que dificilmente podem ser transferidos para outras áreas de aplicação como SR. As principais razões para isso são:

- No SR os *dados de entrada* são multiespectrais, em parte também multiescalares e, em relação aos dados de imagem geralmente pancromáticos e em mono-escalas nas disciplinas de aplicação mencionadas, aumenta nitidamente não só a complexidade, mas também a redundância e com isto a confiabilidade dos procedimentos.

- Estão disponíveis em grande quantidade, *dados adicionais* (p. ex. dados de SIG, dados de altimetria) que podem ser integrados no processo (Koch et al., 1997), há também aqui um aumento de complexidade.

- Em relação a outras aplicações, *diversos objetos com características heterogêneas* (com relação à forma, comportamento espectral, texturas, relações de vizinhança etc.) precisam ser classificados, porém, uma integração de diferentes características não foi ainda considerada de modo satisfatório:

- Especialmente objetos de tamanhos diferentes (tridimensionais) são observados, porém, os métodos existentes não permitem *interpretações multiescalares* satisfatórias. Já existem concepções para isto a partir de outras disciplinas (p. ex. da informática aplicada, Olsen, 1996; Tilton, 2000), e em alguns setores do SR (p. ex. para a extração de ruas a partir de fotos aéreas, Ebner et al. 1998) uma estratégia multiescala já foi aplicada com sucesso;

- Em SR as classificações orientadas por modelos têm sido muito *difíceis a impossíveis*;

- Em SR, via de regra, *as interpretações, em tempo real ou dinâmicas, não têm sido necessárias* e assim estratégias sub-ótimas de solução podem ser eliminadas.

Assim, também na área de SR os procedimentos de segmentação foram desenvolvidos e aplicados faz pouco tempo (Ryherd e Woodcock, 1996; Halle, 1999; Jahn, 1997). Somente a partir de 2000 passaram a existir os primeiros pacotes comerciais de software, p. ex. o *Stand Delineation Tool* (ferramenta para delinear estandes), da empresa finlandesa Arboreal, para aplicações na área de florestas ([www.arboreal.fi](http://www.arboreal.fi)) ou o produto eCognition, da Fitza Definiens ([www.definiens-imaging.com](http://www.definiens-imaging.com)), que segue uma concepção mais geral e que foi usado para as nossas pesquisas.

O algoritmo implementado em eCognition reúne regiões vizinhas da imagem em segmentos, cujo grau de ajuste (*degree of fitting*) é menor do que um parâmetro de escala (*scale parameter*) dado previamente. O grau de concordância pode ser determinado tanto para a variância espectral como para os parâmetros de forma. O valor do limiar definido acima determina, finalmente, o tamanho e a quantidade dos segmentos resultantes. Através da variação dos parâmetros e da ponderação dos dados individuais, pode-se produzir uma representação hierárquica em multiescala da cena, por segmentos. A classificação posterior é efetuada dentro de uma concepção de lógica *fuzzy*. Uma descrição detalhada do algoritmo é fornecida por Baatz e Schäpe (2000).

## 5.4 Estudos de Segmentação Integradora

### 5.4.1 Objetivos

O objetivo de nosso estudo consiste na melhoria e operacionalização da segmentação para classificações de uso do solo (item 5.4.2) e na atualização do conjuntos de dados já

disponíveis (item 5.4.3). Para tanto a seleção das fontes de dados adequada (dados de SR e SIG) e o critério de homogeneidade têm um papel fundamental. A qualidade do resultado deve ser medida conforme os seguintes critérios:

- Robustez dos resultados em relação à geometria (posição dos limites de segmentos) e semântica (pertinência de uma classe a um só segmento);
- Grau de automatização;
- Transparência e controle da segmentação.

#### 5.4.2 Classificação de uso do solo

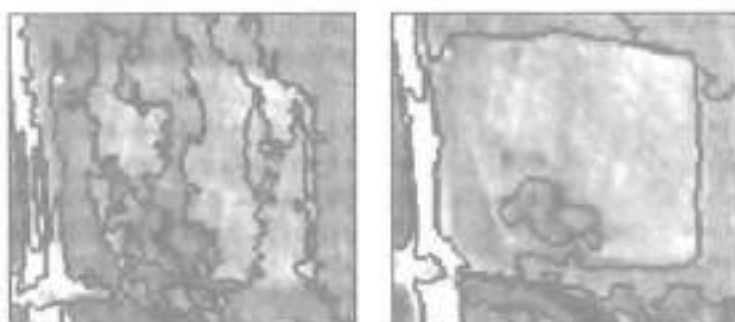
Enquanto classificações de uso do solo para áreas urbanas, baseadas em dados multissensores (imagens e *laser scanning*), foram descritas exemplarmente por Schiewe et al. (2001), apresentamos a seguir um exemplo de uma área rural, baseada em dados de SR multiespectrais.

Os dados-teste, que cobrem uma parte do canal dos rios Meno-Danúbio, são resultado de um imageamento executado por ordem da *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG, Koblenz), a Agência Federal de Águas da Alemanha, que pretendia analisar a viabilidade de utilização de dados da *High Resolution Stereo Camera – Airborne* (HRSC-A, Hoffmann et al., 2000b; Wewel et al., 1998) para uma classificação de biótipos ao longo de hidrovias federais, em regiões com forte relevo.

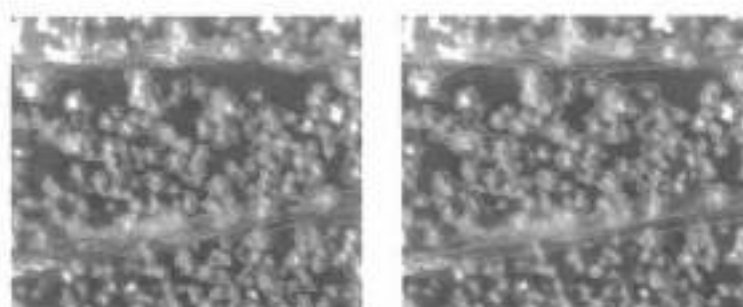
A resolução espacial dos dados de imagens multiespectrais foi de 30 cm e para o Modelo Digital da Superfície (MDS) de 200 cm. A precisão do MDS foi de aproximadamente 20 a 30 cm na direção horizontal e de aproximadamente 50 cm na direção vertical. O MDS foi recalculado para uma malha de 30 cm de lado, para poder usá-lo na segmentação em combinação com os dados multiespectrais. Um modelo digital de superfície normalizado (MDSn) não foi obtido, visto que não estava disponível um modelo digital de terreno (MDT). Uma normalização com métodos alternativos não levou a um resultado satisfatório por causa da resolução espacial e a baixa precisão dos dados (Schiewe, 2001). Um conjunto de dados vetoriais do uso do solo, baseado numa interpretação visual dos dados do HRSC-A está disponível.

O objetivo é produzir uma classificação de uso do solo considerando as seguintes classes previamente definidas no catálogo de objetos: canal, campos agrícolas em uso, campos agrícolas sem uso, campo, pequenos grupos de árvores, arbustos e estradas. A Fig. 5.3 mostra um exemplo de segmentação para uma pequena superfície, cuja delimitação através do uso exclusivo do canal pancromático não pode ser feita corretamente por segmentação. Somente o uso ponderado do canal vermelho e infravermelho próximo forneceu uma delimitação do segmento semanticamente correta. A utilização do MDS, devido à sua resolução demasiadamente grosseira, bem como devido à falta de um MDSn, não resultou em melhoria.

Estando disponíveis dados de SIG – como por exemplo limites de lotes do mapa base ALK (mapa automatizado de imóveis da Alemanha) ou limites de florestas a partir de conjuntos de dados do Departamento de Florestas – podem ser usados como um plano temático. Os dados, porém, só podem ser usados no formato *Raster*, de modo que é necessária uma conversão vetorial-*raster*. A Fig. 5.4 mostra um exemplo no qual, durante a segmentação de uma área de floresta, foi utilizado um plano temático com estradas, onde se resolveu o problema das árvores que recobrem em parte as estradas. Se além de dados geométricos estiverem ainda disponíveis dados informativos para os planos temáticos, poderão ser utilizados na classificação como informações adicionais.



**Fig. 5.3** Resultado de uma segmentação com dados multiespectrais (à direita) em comparação com dados pancromáticos (à esquerda)



**Fig. 5.4** Resultado de uma segmentação sem (à esquerda) e com (à direita) dados de estradas como plano temático

Em função da reduzida precisão geométrica em comparação com os dados da HRSC-A, dados do ATKIS (Sistema de Informação Topográfico-Cartográfico Oficial da Alemanha) não puderam ser usados nesta região de estudos.

No que se refere à robustez do procedimento, há um nítido progresso em comparação com os procedimentos tradicionais. O procedimento produz regiões homogêneas com semântica inequívoca e precisão geométrica satisfatória. Por outro lado, os passos de trabalhos individuais do procedimento baseado em regiões exigem interações manuais que consomem tempo. A escolha do valor do limiar (parâmetro de escala), os dados de entrada e os seus fatores de ponderação são de responsabilidade do usuário. Ao contrário da interpretação visual, ocorre uma separação entre a segmentação e a classificação da imagem. Como os segmentos são a base da posterior classificação precisam ser verificados visualmente. Com relação à transparência do software aplicado, ficou comprovado que com o aumento da complexidade o controle (p. ex. de valor do limiar abstrato) e o conhecimento diminuem nitidamente.

### 5.4.3 Atualização de dados do SIG

Os novos sensores, em função de suas superiores resoluções geométrica e temporal, abrem novas possibilidades para a obtenção e atualização de dados, especialmente em áreas

urbanas e suburbanas. A seguir, pretendemos demonstrar, através de dois exemplos, como os dados de varredura a laser (*Laserscanning*) combinados com métodos de interpretação, baseados em regiões, podem ser utilizados para a rápida atualização de prédios.

No primeiro exemplo é representado um conjunto de dados do Mapa Automatizado de Imóveis (ALK) do setor do Castelo de Stuttgart, onde foi anexado artificialmente um edifício de fato inexistente (Fig. 5.5), mostrando como podem ser atualizados estes mapas. Como fonte de atualização foram usados dados de *Laserscanning* do sensor *TopoSys* (Toposys, 2001), cujas medições de distância originais estão disponíveis com uma precisão de aproximadamente 15 cm,



Fig. 5.5 Conjunto de dados ALK incluindo um prédio artificial, de fato não-existente

numa grade regular de 1 m, a partir dos quais foi derivado um Modelo de Superfície normalizado (Schiewe 2001). Como somente foram executadas medições de último pulso, foram modelados edifícios e não as árvores.

É possível a segmentação propriamente dita dos prédios na base dos dados de *Laserscanning* sem maiores problemas (Schiewe et al., 2001). Os prédios do conjunto de dados ALK modificados são anexados aos mesmos como segmentos e, assim, estão disponíveis para a análise. A classificação do prédio adicional e que, atualmente, não mais existe, pode ser efetuada através da seguinte regra simples:

Quando o segmento no conjunto de dados ALK foi identificado como prédio e a altura no MDSn estiver abaixo do valor do limiar, então este prédio não existe mais.

Num segundo exemplo deve ser introduzido um objeto, ou seja uma mudança de construção no conjunto de dados ALK que anteriormente foi artificialmente retirado (Fig. 5.6, à esquerda). Através da integração dos limites de segmentos da fonte de dados atuais (neste caso, os dados

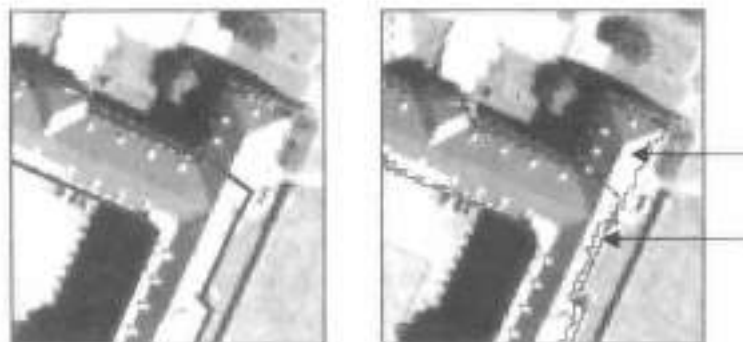


Fig. 5.6 Dados ALK modificados do castelo de Stuttgart (à esquerda) e o resultado da integração da segmentação do conjunto de dados ALK modificado (à direita)

de *Laserscanning*) e dos limites de prédios a partir da ALK, obtém-se um plano com novos segmentos. Por meio da definição de regras para a classificação, os setores modificados poderão ser qualificados adequadamente como tais (vide Fig. 5.6, à direita). Em função dos desvios geométricos entre os limites de segmentos, ocorre a formação de polígonos residuais. Para que não sejam classificados erroneamente como "modificações", podem ser estabelecidos tamanhos mínimos como regras.

### 5.5 Resumo e Perspectivas

Em razão do desenvolvimento de sistemas sensores com resoluções espaciais cada vez maiores, os tradicionais procedimentos de classificação multiespectral são pouco indicados para as novas imagens de SR ou para os dados de *Laserscanning*. Aqui constituem uma alternativa apropriada, procedimentos multiescala que se baseiam em regiões que procedem de modo análogo a análise espacial através de intérpretes humanos, constituindo-se de uma segmentação e de uma classificação propriamente dita. Enfocando principalmente a segmentação, foi possível verificarmos exemplarmente o grande potencial, mas também os problemas ainda existentes de um pacote de software disponível (*eCognition*) para finalidades de classificação (vide também Schiewe et al., 2001). Além disso, foi demonstrado também que a atualização de conjuntos de dados SIG vetoriais pode ser realizada sem problemas através de dados atuais de *Laserscanning* no formato  *raster*.

Finalizando, cumpre informar que a concepção de procedimentos baseados em regiões e sua implementação, representam um importante passo para uma interpretação integrada de dados SIG e SR. Devido à complexidade da análise de imagens – especialmente devido à heterogeneidade dos objetos a serem extraídos – ainda são necessários diversos desenvolvimentos adicionais que, do nosso ponto de vista, precisarão considerar fortemente as concepções orientadas a modelos.

### 5.6 Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes instituições pela disponibilização de dados: os dados de *Laserscanning* e ALK da área-teste Stuttgart foram fornecidos pelo Projeto OEEPE "*Laser Data Acquisition*", a ortoimagem digital foi fornecida pelo Serviço de Geodésia do Estado de Baden-Württemberg ([www.lv-bw.de/LVShop2/index.asp](http://www.lv-bw.de/LVShop2/index.asp)). A publicação dos dados do HRSC-A do Canal Reno-Danúbio foi possível graças à gentil autorização da Agência Federal de Águas (BRG, Koblenz).

### 5.7 Referências Bibliográficas

- APLIN, P.; ATKINSON, P. M.; CURRAN, P. J. Per-field classification of land use using the forthcoming very fine spatial resolution satellite sensors – problems and potential solutions. In: ATKINSON, P. M.; TATE, N. J. (Ed.) *Advances in remote sensing and GIS Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons, pp. 219-239, 1999.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolutional segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Heidelberg, Wichmann, pp. 12-23, 2000.



- CUSHNIE, J. L. The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 1, pp. 15-29, 1987.
- EBNER, H.; BAUMGARTNER, A.; STEGER, C. Automatische Extraktion von Strassen aus Luftbildern. *Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, v. 85, n. 3, pp. 177-186, 1998.
- EHLERS, M.; EDWARDS, G.; BEDARD, Y. Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 55, n. 11, pp. 1619-1627, 1989.
- GUSTAFFSON, F. *Segmentation of signals using piecewise constant linear regression models*. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000.
- HALLE, W. *Ausgewählte Algorithmen der Segmentierung und Klassifikation zur thematischen Bildverarbeitung in der Fernerkundung*. Dissertation TU Berlin, DLR-Forschungsbericht, 1999.
- HANDELS, H. *Medizinische Bildverarbeitung*. Stuttgart, Teubner, 2000.
- HANDMANN, U.; LEEFKEN, I.; TZOMAKAS, C.; von SEELEN, W.; GOERICK C. Analyse dynamischer Szenen. *Photogrammetrie und Fernerkundung, Neue Sensoren – Neue Anwendungen*. 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, pp. 227-234, 1999.
- HANDMANN, U.; LORENZ, G.; von SEELEN, W. *Fusion von Basisalgorithmen zur Segmentierung von Strassenverkehrsszenen*. Mustererkennung, Heidelberg: Springer Verlag, pp. 101-108, 1998.
- HARALICK, R.; SHAPIRO, L. G. Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 12, pp. 100-132, 1985.
- HARALICK, R.; SHAPIRO, L. G. *Computer and robot vision*. Reading, Addison-Wesley, 1992.
- HARRIS, P. M.; VENTURA, S. J. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 61, n. 8, pp. 993-998, 1995.
- HOFFMANN, A.; SMITH, G. M.; LEHMANN, F. Die Klassifizierung hochauflösender Daten – ein Per-Parcel-Ansatz mit Daten des digitalen Kamerasystems. HRSC-A. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Heidelberg, Wichmann, pp. 228-237, 2000a.
- HOFFMANN, A.; van der VEGT, J. W.; LEHMANN, F. Die automatische Aktualisierung von Karten: neue Methoden mit Daten der digitalen Kamera HRSC-A. *Kartographische Nachrichten*, v. 50, n. 5, pp. 211-217, 2000b.
- HORSCH, A.; T. LEHMANN *Bildverarbeitung für die Medizin 2000. Algorithmen – Systeme – Anwendung*. Berlin: Springer Verlag, 2000.
- JAHN, H. An unified Approach for Grey Value and Texture Segmentation. In: SANDAU, R.; JAHN, H. (Ed.) *Autonome Sensorsysteme II, Aspekte, Methoden, Komponenten, Systeme*. Forschungsbericht 97-03, DLR, Institut für Weltraumsensorik, Berlin, 1997.
- JÄHNE, B. *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- JANSSEN, L. L. F.; MOLENAAR, M. – Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of GIS and remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 3, pp. 749-758, 1995.

- JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 65, n. 5, pp. 611-622, 1999.
- KOCH, H.; PAKZAD, K.; TÖNJES, R. Knowledge based interpretation of aerial images and maps using a digital landscape model as partial interpretation. In: Förstner, W.; Plümer (Ed.) *Semantic modeling for the acquisition of topographic information from images and maps*. Birkhäuser-Verlag, Basel, pp. 3-19, 1997.
- LOBO, A.; CHIC, O.; CASTERAD, A. Classification of Mediterranean crops with multisensor data: per pixel versus per-object statistics and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 12, pp. 2385-2400, 1996.
- OLSEN, F. O. *Multi-scale segmentation of grey-scale images*. Dissertation. Dept. of Computer Science, University Copenhagen, 1996.
- RYHERD, S.; WOODCOCK, C. Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 62, n. 2, pp. 181-194, 1996.
- SCHIEWE, J. *Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen*. PGE, heft 2, pp. 81-90, 2001.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *Geo-Information-Systeme*, heft 6, pp. 34-39, 2001.
- von SEELEN, W.; GILLNER, W.; GOERICK, C.; HANDMANN, U.; KALINKE, T.; KASTRUP, D.; LEEFKEN, I.; LORENZ, G.; NOLL, D.; TZOMAKAS, C.; VOELPEL, B.; WERNER, M.; WINKE, C. *Technische Bildverarbeitung dynamischer Szenen*. Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Internal Report 97-13, 1997.
- TILTON, J. C. *Hierarchical image segmentation as applied to remotely sensed multispectral and hyperspectral imagery*. <http://iifs.gsfc.nasa.gov/code935/tilton/>. 2000. TopoSys. [www.toposys.com](http://www.toposys.com). 2001.
- WESFREID, E.; WICKERHAUSER, V. *Vocal command signal segmentation and phoneme classification*. Wireless Networks, 1999.

## Monitoramento Hiperespectral de Lagoas de Resíduos de Mineração de Linhita a Céu Aberto com Métodos Inovadores

Judith Frauendorf, Cornelia Glässer, Carsten Olbert e Jürgen Fischer

### 6.1 Introdução

A região central alemã entre Leipzig e Halle experimentou, nos últimos dez anos, uma mudança em sua paisagem. As áreas que sofreram intensivos impactos ambientais devido à extração de linhita estão dando lugar progressivamente a uma paisagem voltada para o lazer, implantação de florestas e proteção ambiental, as assim denominadas "paisagens posteriores à mineração".

Devido à extração da linhita, conforme visualizado esquematicamente na Fig. 6.1, inicialmente ocorreram profundas modificações na paisagem. Além de destruição da vegetação e da modificação do ciclo hidrológico das águas em profundidade e da morfologia, cursos d'água foram alterados e vilas mudadas. As camadas geológicas intermediárias do Terciário, bem como as camadas de cobertura do Quaternário e os assim denominados "substratos móveis" permaneceram no relevo criado pela extração da linhita. Por meio desse processo de revolvimento, os sedimentos terciários foram intensivamente arejados, o que resultou, dentre outros, na oxidação dos minerais de pirita e marcasita, que contêm sulfetos de ferro.

Passaram-se décadas da deposição desses sedimentos, enquanto os sulfetos de ferro resultaram em ácido sulfúrico e íons de ferro. Após o término da exploração a céu aberto e portanto da drenagem por meio de poços construídos nas bordas (Fig. 6.1), ocorreu uma surgência espontânea do nível freático, nessa forma de relevo artificial (Lub, 1995).



Fig. 6.1 Exploração a céu aberto de linhita empregando tecnologia de ponte transportadora.

Essa água de profundidade, que se acumula nos substratos móveis, lixivia nos sedimentos terciários o ácido sulfúrico disponível, e por isso as lagoas que se formam podem apresentar valores de pH de até 2 (*acid mine drainage* – AMD) (Geller et al., 1998). O preenchimento total das formas côncavas criadas com a mineração a céu aberto com água do nível freático, pode levar várias décadas, sendo que esse preenchimento com água é a única opção disponível para equilibrar o déficit de massa. Para reduzir esse período de tempo e para neutralizar as lagoas acidificadas, as lagoas de resíduos disponíveis são adicionalmente preenchidas com água de superfície.

Essas lagoas são regularmente analisadas pelos órgãos responsáveis, antes e especialmente durante o enchimento com água de superfície. A análise porém é somente pontual. Dentre essas tarefas, destacam-se, além do controle do nível d'água, especialmente o controle da evolução da qualidade d'água antes e durante o enchimento com águas superficiais. Por meio das tomadas de amostras pontuais é analisada a qualidade d'água em pontos de amostragem, porém as respectivas áreas não são diferenciadas dentro de uma lagoa e entre as diversas lagoas. Essa falta de informações pode ser preenchida pelo monitoramento dessas lagoas, usando-se dados de sensoriamento remoto (SR). O SR de águas interiores já tem sido efetuado com sucesso desde os anos 1990 pela derivação de diversos parâmetros como a concentração de clorofila e de substâncias em suspensão (Dekker, 1993). Por meio do desenvolvimento de métodos inovadores, foi possível pela primeira vez utilizar métodos de SR também em águas residuais de mineração a céu aberto.

## 6.2 Descrição da Área-teste

A mineração a céu aberto Goitsche, que se encontra a aproximadamente 50 km ao norte da cidade de Leipzig, no distrito de Linha da Alemanha Central (Fig. 6.2), foi iniciada no ano de 1949. Durante a extração formaram-se quatro cavas (Mühlbeck, Niemeck, Bärenhof e Döbern), as quais, desde o seu fechamento em 1991, foram preenchidas com água, com o reestabelecimento do nível d'água freático. Os níveis d'água das lagoas de resíduos Mühlbeck, Niemeck e Döbern durante esse enchimento, a partir de um certo momento devido ao constante bombeamento, foram mantidos na mesma altura, para evitar outras acidificações (Fig. 6.2; níveis d'água/valores do pH em 06/1998: Mühlbeck – 51,5 m sobre o nível do mar (snm)/3,0, Niemeck – 40 m snm/2,9, Döbern 35 m snm/7,3). A idéia era subir os níveis d'água disponíveis, com a ajuda das águas superficiais, a uma elevação d'água final de 75 metros snm de modo a originar a superfície d'água apresentada na Fig. 6.2. Após a conclusão do sistema com dispositivo de enchimento, em julho de 1998 foi efetuado um teste de funcionamento, enquanto o nível d'água da lagoa residual Mühlbeck subiu de 51,5 a 53,5 m snm. Desde 07 de maio de 1999 a cava restante de Goitsche foi cheia com água a 3 m<sup>3</sup>/s a partir de um antigo braço da depressão (Fig. 6.2). Um mês depois, o nível d'água alcançou, na lagoa de resíduos Mühlbeck, a marca de 57 m snm, e em função disso, ocorreu o enchimento da lagoa de resíduos Niemeck. No final do ano de 1999 o nível d'água nas lagoas de resíduos Mühlbeck e Niemeck estava a 59,2 m. snm e em consequência disso, a água transbordou através de um canal na lagoa de resíduos Döbern. Em agosto de 2000 o nível d'água estava em 62,0 m snm, de modo que a cava Bärenhof foi cheia com água. No início de abril de 2001 foi alcançada a marca d'água de 69 m snm. O nível d'água intermediário de 71,5 m snm autorizado, seria alcançado provavelmente no final de 2001. Após 3 anos de pausa no enchimento dessas lagoas, o nível d'água final autorizado e a marca 75 m snm deverá ser alcançada.



Fig. 6.2 a) Visão de conjunto das regiões de extração de linhita a céu aberto na Alemanha Central (□). (Base de dados, imagem Landsat-TM de 1989); b) Principais furos restantes da extração a céu aberto Goitsche com o nível final de enchimento com água de 75 m snm. (—). (Base de dados: cena do sensor CASI de 29.06.1998)

### 6.3 Métodos

Para o desenvolvimento de métodos inovadores de análise dos dados de SR foram necessárias várias visitas de campo, para determinar diferentes parâmetros da qualidade d'água e executar, em paralelo, sobrevôos visando a obter os dados de SR.

#### 6.3.1 Medições em campo e em laboratório

Em vários pontos de tomada de amostras dentro das lagoas residuais, foram medidos os valores de pH, temperatura e condutividade, bem como a profundidade Secchi, por meio do disco de Secchi. As amostras d'água foram tomadas a cada 0,5 m até a profundidade Secchi, misturadas e, para as diferentes análises de laboratório, parcialmente filtradas e divididas. Além disso, foram determinadas as capacidades de acidez e de bases. A partir das amostras não filtradas, foram determinadas as substâncias em suspensão (orgânicas e inorgânicas) e do teor de clorofila. Nas amostras filtradas foram analisados os cátions (Fe, Al, Mn, Ca, K, Zn) com espectroscopia de emissão atômica (ICP-AES) e os ânions (sulfato, cloreto, nitrato) com cromatografia iônica. Além disso, determinou-se o coeficiente de material dissolvido e particulado com ajuda de um fotômetro de dupla radiação.

#### 6.3.2 Missões de imageamento com o sensor hiperespectral CASI

Ao longo dos quatro anos da tomada de amostras, de 1998 até 2001, foram feitas várias missões de imageamento da extração a céu aberto Goitsche com o sensor aerotransportado

hiperspectral CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). As missões foram realizadas no "modo espectral realçado" (*enhanced spectral mode*), que cobre a faixa de comprimento de onda de 428 a 975 nm e contém 48 bandas espectrais, com uma largura de faixa de 11 nm cada uma. Numa altitude de voo de 2.500 metros foi alcançado um tamanho de *pixel* de 3 x 3 metros. Para cobrir toda a área de estudo foram necessárias 6 faixas de imageamento com 1,5 km de largura cada.

## 6.4 Resultados

### 6.4.1 Classificação limnológica das lagoas de resíduos de mineração a céu aberto

Com base nos dados limnológicos e ópticos, as lagoas de resíduos da mineração a céu aberto, em conformidade com Pietsch (1979), foram classificadas em cinco estágios diferentes de evolução, desde o estágio de entrada d'água do nível freático (estágio inicial) até a equiparação às condições naturais (estágio final). A Tab. 6.1 dá uma visão de conjunto sobre as propriedades características de cada estágio.

**Tab. 6.1** Classificação limnológica das lagoas de resíduos de mineração a céu aberto (adaptado de Pietsch)

Estágio	Estágio inicial	Primeiro estágio	Estágio de transição I	Estágio de transição II	Estágio final
Valor de pH	< 3,2	3,2 a 4,3	3,3 a 8,0	4,3 a 8,0	> 7,0
Concentração					
Íons de ferro	Muito elevado	Elevado	Pequeno	Pequeno	Muito pequeno
Ácido sulfúrico	Muito elevado	Elevado	Pequeno	Pequeno	Nenhum
Carbonato de hidrogênio	Nenhum	Pequeno	Variável	Variável	Elevado
Clorofila	Variável	Variável	Pequeno	Pequeno	Variável
Substâncias em suspensão	Variável	Variável	Elevado	Pequeno	Variável

No estágio inicial, as lagoas apresentam acidificação muito forte, à medida que a subida do nível d'água de profundidade, propicia entrada de ácido sulfúrico dos resíduos na lagoa. Um exemplo disso é a lagoa de resíduos Niemegek antes do enchimento, com um valor de pH de 2,9. Se os depósitos dos resíduos em volta não contiverem pirita, ou seja, se não contiverem produtos de oxidação da pirita ou elevadas concentrações de sedimentos carbonáticos que atuem como *buffers* de acidez, as águas ascendentes possuem pouca ou nenhuma acidez, as lagoas apresentam valores de pH na faixa neutra. Nas lagoas em que a acidez disponível era abatida por carbonato, por meio da precipitação dos íons de ferro disponíveis, resultaram complexos de hidróxido de ferro, que originaram uma elevada concentração de substâncias em suspensão. Dependendo da concentração de sedimentos que atuassem como *buffers* de acidez, puderam ser medidos valores de pH entre 3,3 e 8,0 (estágio de transição I). Um exemplo disso é a lagoa de resíduos Döbern antes do enchimento, com um valor de pH em torno de 7,2.

Lagoas nas quais não havia nas redondezas depósitos residuais encontram-se, após a subida do nível freático, no estágio de transição II, ou seja, originam-se lagoas muito claras com pequenas concentrações de clorofila e de substâncias em suspensão.

Ao longo do tempo, nas lagoas acidificadas, a acidez é gradualmente diminuída por processos hidro-biológicos e hidro-químicos. Na seqüência, essas lagoas alcançam o estágio seguinte até o estágio final. Esses processos levam via de regra várias décadas, quando as lagoas são preenchidas com águas devidas tão somente à subida do nível freático. Na medida em que estas lagoas receberam águas superficiais, estes processos ocorrem em lapsos de tempo bem mais curtos. Assim por exemplo a evolução da lagoa de resíduos Niemegek levou, do estágio inicial até o final, apenas 1 ano e meio. A condição no estágio final, na terminologia considerada, é equivalente à condição limnológica de águas naturais.

Os estágios mostrados na Tab. 6.1, apresentam não somente características limnológicas iguais, mas também características ópticas similares, isto é, características iguais de absorção e de retroespalhamento (Boine e Glässer, 2000). Essas características de absorção e de retroespalhamento das diferentes substâncias contidas na água, influenciam fortemente o respectivo espectro de reflexão. Conforme perceptível na Fig. 6.3, os espectros de reflexão dos dados do CASI possuem uma forma característica para cada estágio.

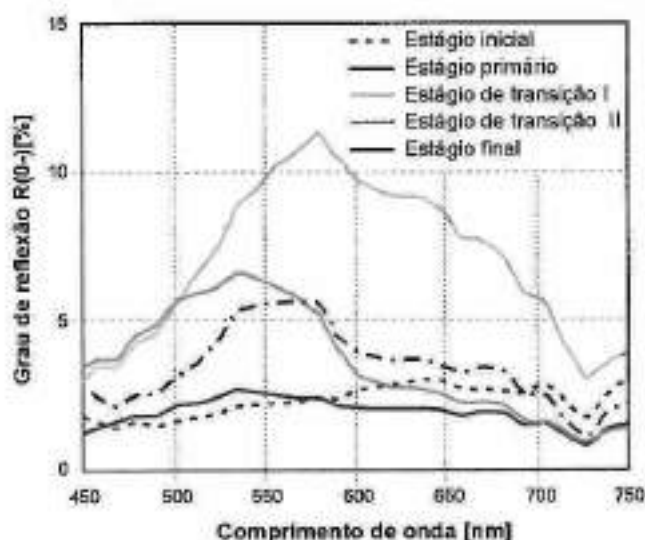


Fig. 6.3 Espectros de reflexão CASI da mineração a céu aberto Goitsche

#### 6.4.2 Desenvolvimento de algoritmos

Com base nos espectros de reflexão apresentados (Fig. 6.3) para cada estágio, foram analisados empiricamente vários espectros e extraídos critérios significativos de discriminação. Para obter algoritmos sólidos contra erros, esses critérios baseiam-se principalmente em diferenças e aumentos. Os seguintes parâmetros foram determinados para a subdivisão em estágios e estão visualizados graficamente na Fig. 6.4:

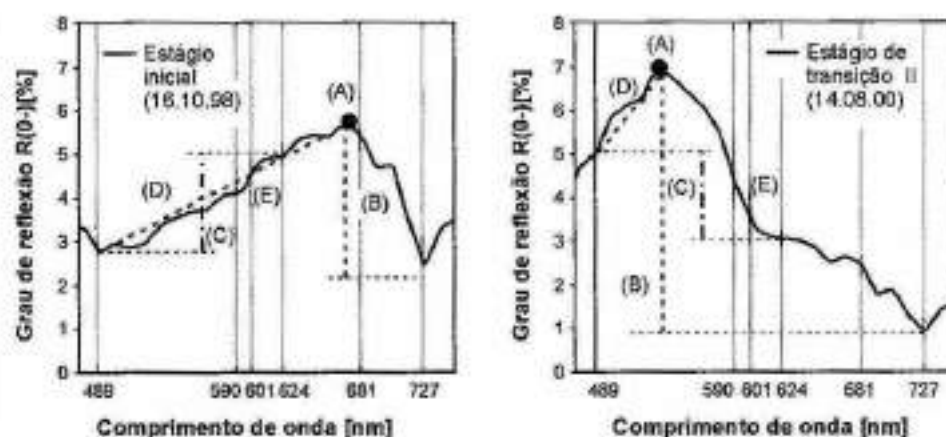


Fig. 6.4 Representação gráfica dos critérios extraídos, a partir de exemplos dos espectros de reflexão do CASI, para o estágio inicial e o estágio de transição II

- (A) Comprimento de onda do valor máximo de reflexão;
- (B) Valor máximo de reflexão (entre 489 nm e 681 nm) menos o valor mínimo de reflexão (entre 489 nm e 727 nm);
- (C) Reflexão a 489 nm menos a reflexão a 624 nm;
- (D) Aumento entre o máximo de reflexão e a reflexão a 489 nm;
- (E) Aumento entre a reflexão a 590 nm e 601 nm.

O comprimento de onda do valor máximo de reflexão (A) demonstrou ser o primeiro e muito bom parâmetro para a discriminação dos estágios. Assim, por exemplo, todas as lagoas do estágio inicial possuem um valor máximo de comprimento de onda superior a 620 nm, enquanto o valor máximo de comprimento de onda do estágio de transição II se encontra na faixa de comprimento de onda inferior a 560 nm (vide Tab. 6.2). A faixa de comprimento de onda utilizada no âmbito do desenvolvimento de algoritmos, estende-se de 489 nm até 727 nm, visto que nesta faixa o erro do espectro do CASI é inferior a 2% e as influências atmosféricas são mínimas. Para o critério (B) foi calculado o valor máximo de reflexão somente entre 489 nm e 681 nm, visto que no caso de altas concentrações de clorofila, existem dois valores máximos locais. O primeiro valor máximo é causado aqui pelas características de absorção e retroespalhamento de todas as substâncias contidas na água e pela água em si. O segundo valor máximo, de aproximadamente 704 nm, é devido à absorção muito elevada da clorofila em 676 nm. Na avaliação dos espectros de reflexão para a divisão em estágios, somente o primeiro valor máximo é de importância, este é determinado somente entre 489 nm e 681 nm. A diferença entre 489 nm e 624 nm também se apresentou como um possível critério para a divisão em estágios (critério C), visto que em 624 nm há um platô na maioria dos espectros, o qual é originado da absorção pela água. Se o valor máximo de reflexão for menor de 620 nm e essa diferença maior do que 0, trata-se, via de regra, de uma lagoa muito clara, a qual é agrupada no estágio de transição II (Tab. 6.2). Através da análise de todas as elevações dos espectros de reflexão, os critérios (D) e (E) também se apresentaram como adequados para a diferenciação dos estágios.



A Tab. 6.2 fornece uma visão de conjunto sobre as faixas dos critérios que foram utilizados para a divisão em estágios. Para transpor esses critérios aos dados do CASI (classificação temática), foi escrito na linguagem computacional IDL, um programa, explicado a seguir.

Tab. 6.2 Conjunto dos limites de estágios de acordo com as características de reflexão seleciona-

	$\lambda$ DO VALOR MÁXIMO DE REFLEXÃO (A)	$R_{Max} - R_{Min}$ (B)	$R_{489nm} - R_{524nm}$ (C)	$(R_{Max} - R_{489}) / (\lambda_{max} - 489nm)$ (D)	$(R_{592nm} - R_{691nm}) / (592nm - 691nm)$ (E)
Estágio inicial	> 620	< 4	$-4 < x < 0$	$0 < x < 20$	> 15
Primeiro estágio	$540 < x < 550$	> 3	-----	> 50	< - 50
	$550 < x < 560$	< 4	-----	-----	< - 80
	$550 < x < 560$	< 3,5	-----	-----	< - 50
Estágio de transição I	> 600	> 4	< - 5	> 30	-----
	$580 < x < 600$	> 1,75	< 0	> 20	< 20
	$560 < x < 580$	> 3,5	< 0	$30 < x < 50$	< - 30
Estágio de transição II	< 560	-----	> 0	-----	< - 90
	$560 < x < 600$	< 1,75	> - 1,5	< 20	> - 20
Estágio final	$550 < x < 560$	< 5	$-2 < x < 0,5$	-----	$< -30 < x < 30$
	$540 < x < 550$	-----	$-2 < x < 0,5$	-----	> - 40
	< 540	-----	-----	-----	> - 40

### 6.4.3 Classificação dos dados do CASI

Para a classificação foram inicialmente lidos dados do CASI no programa IDL, que também pode ser integrado no pacote ENVI. Os dados do CASI estavam disponíveis no formato de imagem e por isso também foram trabalhados neste programa. Considerando que somente havia interesse na classificação das superfícies d'água, as superfícies terrestres foram recortadas por máscaras. A faixa mais adequada para essa delimitação é a faixa do infravermelho (700 nm até 900 nm), visto que nela muita luz é absorvida pela água e, em contraste com outros materiais (sedimentos, vegetação), apresenta um sinal de reflexão muito fraco. No caso das superfícies d'água, o sinal de reflexão na faixa de comprimento de onda do visível deveria ser maior do que no infravermelho, ao contrário das outras superfícies. Por isso, para a identificação da superfície terrestre foi usado o seguinte questionamento:

$$(\text{MAX}(R_{489nm} \text{ até } R_{692nm}) - \text{MAX}(R_{692nm} \text{ até } R_{876nm})) * 100 < - 2$$

Além disso, não foram considerados na classificação os espectros de reflexão nos quais a mudança máxima do grau de reflexão estava abaixo de 0,9%, considerando que nestes casos não era possível uma interpretação que fizesse sentido. Assim sendo, os cinco critérios foram calculados para cada ponto da superfície d'água e com base num questionamento, a cada *pixel* foi associado o estágio correspondente, isto é, a cada *pixel* foi alocado um valor numérico entre 1 e 6. Os números de 1 a 5 correspondem aqui ao respectivo estágio e o número 6 é alocado

aos pontos de imagem não cobertos pelas faixas pré-determinadas dos critérios e que, por isso, permanecem como não classificados. Na Fig. 6.5 esse procedimento é visualizado.

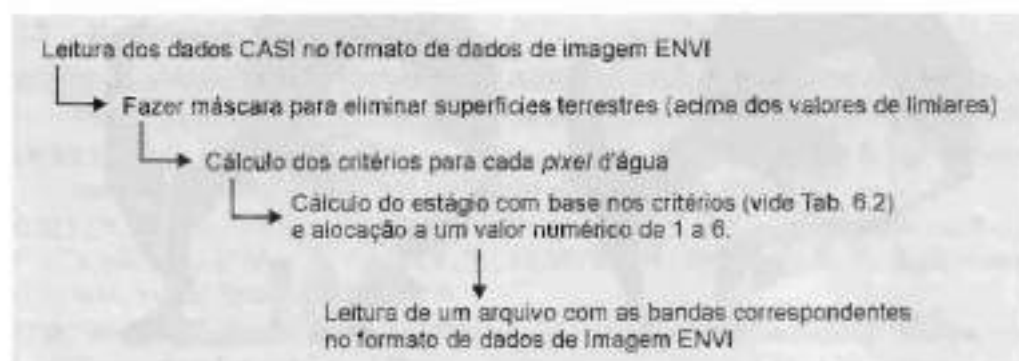


Fig. 6.5 Esquema do programa IDL para a classificação dos estágios

Nas Figs. 6.6a e 6.6b encontram-se os resultados da divisão em estágios com ajuda do programa IDL referente ao processo de enchimento das lagoas de resíduos Goitsche. O processo de enchimento de Goitsche pode ser acompanhado tanto qualitativa como quantitativamente. Observa-se que as lagoas, especialmente as lagoas de resíduos ácidos Mühlbeck e Niemegek evoluíram durante o enchimento, passando do estágio inicial e dos estágios de transição até o estágio final. Além disso, pode-se acompanhar quantitativamente o progresso do processo de enchimento no crescimento passo a passo das superfícies d'água individuais.



Fig. 6.6a Classificação dos dados CASI segundo a divisão em estágios

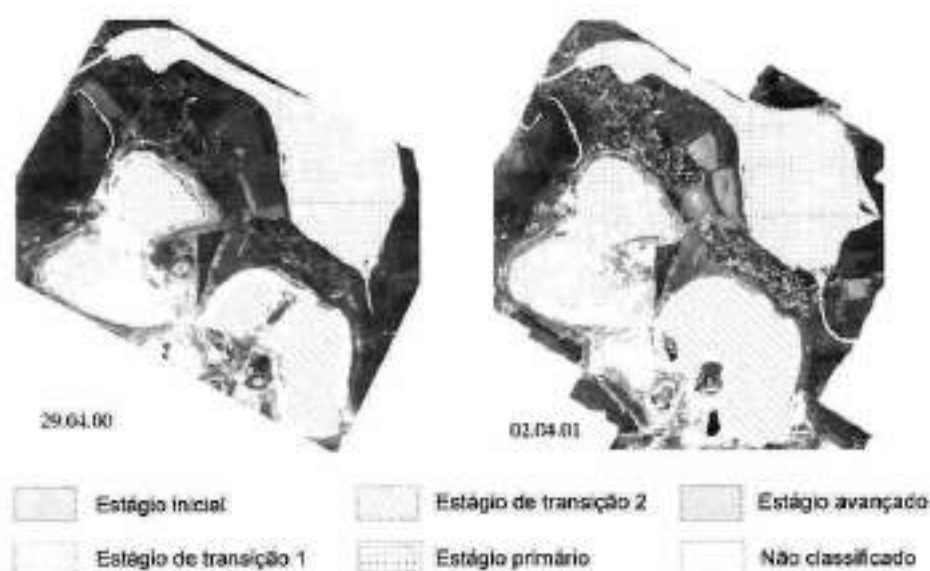


Fig. 6.6b Classificação dos dados CASI segundo a divisão em estágios

## 6.5 Discussão e Perspectivas

A partir dos métodos e resultados apresentados, fica ressaltada a aplicabilidade de dados do CASI para o reconhecimento de lagoas de rejeitos ácidos de mineração a céu aberto, bem como para o controle de processos de preenchimento de cavas de mineração a céu aberto. Além disso, com os métodos introduzidos foi executado pela primeira vez um monitoramento qualitativo e quantitativo de superfícies d'água de uma mineração a céu aberto, com dados de sensoriamento remoto.

A concepção baseada em conhecimento possui a vantagem adicional, no trabalho com dados de SR, em relação aos procedimentos convencionais de classificação como os da *máxima verossimilhança*, que ela pode ser aplicada a outros conjuntos de dados CASI da mesma parametrização, sem ajuste às áreas de aferição. Assim, por exemplo, o método pode ser aplicado ao reconhecimento e controle das lagoas de rejeitos de mineração a céu aberto no distrito de linhita de Lausitz (Alemanha Central), já que lá existe um grande número de lagoas muito ácidas, que nos próximos anos deverão ser sucessivamente preenchidas com água.

Nos trabalhos seguintes, deverão ser derivados não somente os estágios de lagoas de rejeito de mineração a céu aberto, mas também as concentrações de clorofila, sólidos em suspensão, substâncias dissolvidas, bem como a profundidade Secchi.

## 6.6 Agradecimentos

Agradecemos ao Centro de Pesquisas Ambientais (UFZ) Halle-Leipzig pelo apoio financeiro a esta pesquisa, bem como às seções de Pesquisa de Águas e Hidrogeologia da UFZ, pelo

apoio científico. À Empresa de Administração de Mineração de Lausitz e da Alemanha Central Ltda. (LMBV) agradecemos por tornar os dados disponíveis e pelo bom trabalho conjunto.

## 6.7 Referências Bibliográficas

- BOINE (atualmente FRAUENDORF), J.; GLÄSSER, C. Optical properties of open cast lignite mining lakes in Central Germany. In: *Proceedings (CD) of ISPRS XIX*, Amsterdam, 2000.
- DEKKER, A. G. *Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing*. PhD Thesis, Free University of Amsterdam, 1993.
- GELLER, W.; KLAPPER, H.; SCHULTZE, M. Natural and anthropogenic sulphuric acidification of lakes. In: GELLER, W.; KLAPPER, H.; SALOMONS, W. *Acidic mining lakes*. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- LUB. *Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen*. Landesumweltamt Brandenburg, Studien und Tagungsberichte, band 6, 1995.
- MIBRAG. *Tagebau Zwenkau*. Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH, Faltblatt, Besucherinformation, 1998.
- PIETSCH, W. Klassifizierung und Nutzungsmöglichkeiten der Tagebaugewässer des Lausitzer Braunkohlen-Reviers. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, Berlin, v. 19, n. 3, pp. 187-215, 1979.

## Melhoria e Atualização de uma Base de Dados Rodoviários por Meio de Técnicas de Análise de Imagens, Usando Múltiplas Fontes de Conhecimento e Indícios

Chunsun Zhang e Emmanuel Baltsavias

### 7.1 Introdução

A identificação de rodovias a partir de imagens digitais tem aumentado de interesse ultimamente. As abordagens existentes cobrem uma ampla variedade de estratégias, usando imagens aéreas ou de satélite com diferentes resoluções. Visões de conjunto podem ser encontradas em Gruen et al. (1995, 1997) e Foerstner e Pluemer (1997). Esquemas semi-automáticos requerem interatividade humana para fornecer algumas informações para o controle da identificação. As rodovias são identificadas por sobreposição de perfis (Airault et al, 1996, Vosselman e De Gunst, 1997), algoritmos cooperativos (McKeown et al., 1988) e programação dinâmica ou *LSB-Snakes* (Gruen e Li, 1997). Métodos automáticos geralmente produzem hipóteses confiáveis para segmentos de rodovias, por meio da detecção de bordas e linhas e então estabelecem conexões entre segmentos de rodovia para formar redes de rodovias (Wang e Trinder, 2000). Informações do contexto são consideradas para direcionar a obtenção de rodovias (Ruskone, 1996). Rodovias podem ser detectadas em imagens multirresolução (Baumgärtner e Hinz, 2000). As abordagens existentes mostram individualmente que o uso de modelos de rodovias e estratégias variáveis para diferentes tipos de cenas são promissores. Não obstante, todos os métodos baseiam-se em modelos de rodovias relativamente simples e a maioria deles faz uso insuficiente de informação a priori. Assim, são muito sensíveis a distúrbios como carros, sombras e oclusões e nem sempre fornecem resultados de boa qualidade. Além disso, a maioria das abordagens trabalha em imagens 2D simples, negligenciando as informações valiosas inerentes ao processamento em 3D.

Neste capítulo apresentamos um sistema baseado em conhecimento para a obtenção automática de rodovias em 3D de duas ou mais fotografias aéreas que integram o processamento de dados de imagens coloridas e de bases de dados espaciais digitais. A informação da base de dados de rodovias existente fornece um modelo grosseiro da cena. Fotografias aéreas coloridas fornecem a situação atual da cena, sendo, porém, complexas para uma análise sem ajuda de outros dados auxiliares. Por isso, a informação fornecida pela base de dados espacial existente pode ajudar na compreensão da cena, enquanto as imagens fornecem dados reais, úteis para melhorar a antiga base de dados de rodovias e para atualizá-la. O sistema combina diferentes dados de entrada e fornece informações complementares mas também redundantes sobre a existência de rodovias. Com isto, também pode considerar áreas problemáticas causadas por oclusões e sombras, aumentando a taxa de sucesso e a confiabilidade dos resultados da obtenção.

O sistema tem sido desenvolvido dentro do projeto ATOMI (*Automated reconstruction of Topographic Objects from aerial images using vectorized Map Information*), em cooperação com a Agência Federal Suíça de Topografia (L + T), com o objetivo de melhorar as linhas centrais de rodovias obtidas de mapas topográficos digitalizados na escala 1:25.000, ajustando-os à paisagem real, melhorando a precisão planimétrica até 1 m e fornecendo informação altimétrica com precisão de 1-2 m. Os detalhes do ATOMI podem ser encontrados em Eidenbenz et al. (2000). Usamos atualmente imagens coloridas na escala 1:16.000, com 30 cm de distância focal e sobreposição frontal e lateral de 60% e 20% respectivamente, escaneadas a 14 microns num Zeiss Scaï. Os outros dados de entrada incluem: um DTM (modelo digital de terreno) de todo o país com espaçamento da grade de 25 m e precisão de 2,5 m nas áreas baixas e de 10 m nos Alpes, os dados do mapa vetorizado (VEC25) em escala 1:25.000 e o mapa rasterizado com as suas 6 diferentes camadas. Os dados VEC25 possuem um erro RMS de aproximadamente 2,5 a 7,5 m e um erro máximo de aproximadamente 12,5 m, incluindo os efeitos de generalização. Estão topologicamente corretos, porém devido à sua obtenção parcialmente automática de mapas apresentam alguns erros. Adicionalmente, dados de MDS (modelo digital de superfície) na área de trabalho foram gerados a partir de imagens estereoscópicas usando o MATCH-T da INPHO com espaçamento de grade de 2 m.

## 7.2 Estratégia Geral para a Reconstrução de Rodovias em 3D

O sistema desenvolvido faz uso total da informação disponível sobre a cena e contém um conjunto de ferramentas de análise de imagens. O gerenciamento de diferentes informações e a seleção de ferramentas para a análise de imagens são controlados por um sistema baseado em conhecimentos. A estratégia geral é apresentada na Fig. 7.1.



Fig. 7.1 Estratégia da obtenção da rede de rodovias em ATOMI

A base de conhecimentos inicial é estabelecida pela informação extraída dos dados espaciais existentes e das regras de projeto de rodovias. Essa informação é formada em múltiplas camadas orientadas a objetos, isto é, rodovias são divididas em várias subclasses de acordo com o tipo de rodovia, cobertura do solo e relevo. Fornece uma descrição global da topologia de rede da rodovia e a geometria local para um segmento de rodovia. Por isso, evitamos desenvolver um modelo geral de rodovia e ao invés, um modelo específico pode ser alocado para cada segmento da rodovia. Este modelo fornece a localização 2D inicial de uma rodovia na cena, bem como atributos da rodovia, tais como classe de rodovia, presença de marcas de rodovia, cobertura da terra e possivelmente a geometria (largura, comprimento, curvatura horizontal e vertical, etc.). Um segmento de rodovia é processado por um método apropriado correspondente a seu modelo, sendo certas características e indícios extraídos de imagens e rodovias que são derivados por uma combinação adequada de indícios. A base de conhecimentos então é automaticamente atualizada e refinada usando a informação obtida da obtenção prévia de rodovias. O processamento continua a partir das subclasses mais fáceis às mais difíceis. Visto que nem os procedimentos em 2D nem aqueles em 3D são suficientes por si sós para resolver o problema da obtenção de rodovias, fazemos a transição do espaço de imagem 2D para 3D o mais cedo possível e obtemos a rede de rodovias com a interação manual entre características desses espaços. Maiores detalhes da estratégia geral podem ser encontrados em Zhang e Baltsavias (2000).

### 7.3 Métodos para a Extração de Indícios

Quando um segmento da rodovia de VEC25 é selecionado, o sistema enfoca as regiões de imagem em volta da rodovia. As regiões são definidas usando a posição do segmento de rodovia e o erro máximo de VEC25. Então, um conjunto de ferramentas de processamento de imagens é ativado para extrair características e indícios. A geração de bordas retas em 3D é uma componente crucial do nosso procedimento. Estamos interessados em bordas retas em 3D porque os lados corretos das rodovias estão entre elas. A informação 3D de bordas retas é determinada das correspondências de segmentos de borda entre imagens estereoscópicas. A partir de imagens coloridas, um método de classificação de imagens multiespectrais é implementado para encontrar seções de rodovias. Também exploramos indícios adicionais tais como marcas de rodovias para subsidiar a obtenção de rodovias.

#### 7.3.1 Obtenção de bordas retas em 3D

Devido à complexidade de fotografias aéreas e dos diferentes ângulos de visada e de oclusões, a justaposição de bordas retas para a geração de bordas em 3D é uma tarefa difícil em visão computacional e fotogrametria. Desenvolvemos um método de justaposição que explora ricos atributos e informações de estrutura geométrica da borda. Os atributos de borda rica incluem a descrição geométrica da borda e a informação fotométrica nas regiões ao lado da borda (regiões de flancos). A restrição epipolar é aplicada para reduzir o espaço de pesquisa. A medida de similaridade para um par de bordas é computado pela comparação dos atributos de borda. A medida de similaridade então é usada como informação anterior em justaposição estrutural. A justaposição localmente consistente é obtida por meio de justaposição estrutural com probabilidade de relaxamento. Vide Zhang e Baltsavias (2000) para a estratégia detalhada de justaposição.

As imagens de entrada são processadas inicialmente com um filtro Wallis para o realce de contraste e equalização radiométrica (Baltasvias, 1991). As bordas são extraídas usando o operador Canny e o ajuste de linha reta é aplicado, baseado nos procedimentos desenvolvidos num projeto anterior (Amohé, vide Henricsson, 1996). Para cada segmento plano de borda, computamos a posição, o comprimento, a orientação e robusta estatística fotométrica e cromática nas regiões de flancos à esquerda e à direita. As propriedades fotométricas e cromáticas são estimadas a partir dos canais  $L$ ,  $a$  e  $b$  após uma RGB da conversão do espaço de cores em laboratório e inclui a matriz da mediana e do espalhamento.

Com parâmetros de orientação conhecidos, a restrição epipolar pode ser empregada para reduzir o espaço de pesquisa. Os dois pontos finais de um segmento de borda numa imagem geram duas linhas epipolares na outra imagem. Com a informação de altimetria aproximada derivada de dados do MDT ou MDS, define-se uma banda epipolar de comprimento limitado. Qualquer borda incluída nessa banda é uma possível candidata, se ela interceptar as duas linhas epipolares (através dos dois pontos finais de borda na imagem esquerda) dentro desta banda. A comparação com cada borda candidata então é feita apenas no comprimento de sobreposição comum, ou seja, ignorando as diferenças de comprimento e os deslocamentos entre os segmentos de borda. Para cada par de bordas que satisfazem às restrições referidas, seus atributos ricos são usados para calcular um escore de semelhança. Por isso, o escore de semelhança é uma combinação ponderada de vários critérios. A computação detalhada pode ser encontrada em Zhang e Baltasvias (2000).

Após a medição de similaridade, construímos uma lista provisória de candidatos à superposição (*matching pool*) e associamos um escore de semelhança a cada par de bordas candidatas. Considerando que a justaposição usando uma comparação local de atributos de borda não fornece sempre resultados corretos, desenvolvemos um método de justaposição estrutural usando a probabilidade de relaxamento. O método tem por objetivo a probabilidade de que uma borda numa imagem justaponha-se a uma borda na outra imagem, usando a informação de estrutura geométrica e a informação fotométrica de bordas de imagens vizinhas. Por isso, a correspondência das bordas individuais e de estruturas de borda são encontradas. A Fig. 7.2 mostra um exemplo de obtenção e justaposição de borda. As bordas retas obtidas são



Fig. 7.2 Justaposição de borda reta: a) imagem da esquerda, b) imagem da direita



apresentadas em branco e as bordas retas justapostas são apresentadas em preto. Mais exemplos e a avaliação de desempenho podem ser encontrados em Zhang et al. (2001b). A posição final em 3D de cada *pixel* de borda é computada dos *pixels* de borda originais e não das bordas retas encaixadas. Isto é feito na extensão de sobreposição das bordas correspondentes. Uma borda reta 3D então é encaixada nos *pixels* de borda 3D.

### 7.3.2 Classificação de imagem para a detecção de regiões de rodovias

Utilizamos o ISODATA (Jain e Dubes, 1988) para classificar as imagens e separar as regiões de rodovias de outros objetos. O algoritmo classifica automaticamente os dados de imagem nos grupos de objetos desejados. Gera repetidamente uma nova partição, alocando cada padrão ao seu centro de grupo mais próximo e sobrepõe e divide os agrupamentos (*clusters*) existentes ou remove agrupamentos pequenos ou *outliers*. O sucesso da classificação de imagem também depende dos dados usados. Como estamos considerando superfícies de rodovias e sombras (especialmente sombras em superfícies de rodovias), o nosso objetivo é separá-las de outros objetos na imagem, e não nos atermos muito à detecção de outros objetos. A imagem colorida RGB original é transformada em diferentes espaços de cor e as três bandas seguintes são selecionadas para a classificação de imagens: 1) uma banda <sup>+</sup> do espaço de cores de laboratório; 2) uma banda calculada com as bandas R e G no espaço RGB conforme  $(G-R) / (G+R)$ ; 3) banda S do espaço de cores



Fig. 7.3 Exemplo de classificação de imagem

IHS. Com essa classificação evitamos usar um limiar rígido para a segmentação de imagens e 5 classes são determinadas. Elas correspondem a regiões de rodovias, objetos verdes, áreas de sombras, telhados escuros e telhados vermelhos (caso disponível). A Fig. 7.3 é um exemplo de classificação de imagem: as rodovias, as sombras, objetos verdes e telhados escuros são mostrados respectivamente em branco, preto, cinza escuro e cinza claro.

### 7.3.3 Análise de MDS e MDT

Usamos o MDT (ou DTM) e o MDS (ou DSM) no nosso sistema para reduzir o espaço de pesquisa para a justaposição de bordas retas. Também usamos o MDS e o MDT para verificar se uma borda 3D está no solo. Considerando que o MDS idealmente modela os objetos feitos pelo homem bem como o terreno e subtraindo-se o MDT do MDS resulta a separação dos objetos acima do solo (construções e árvores) e objetos no solo (rodovias, etc.). A Fig. 7.4 é um exemplo onde objetos acima do solo são apresentados em cores cinza brilhantes. Combinando-se

uma informação com dados de classificação de imagem, o nosso sistema cria redundância para confirmar a existência de rodovias. Além disso, ele também é usado para corrigir erros em dados de classificação e em áreas de oclusão em que o MDT pode compensar a informação que falta nos dados de classificação.

### 7.3.4 Obtenção de marcas de rodovia e de faixas de passagem de pedestres

Marcas de rodovias e pontos de passagem de pedestres são boas indicações da existência de rodovias. São geralmente encontrados em rodovias principais e rodovias em áreas urbanas. Ambas possuem cores distintas (geralmente brancas ou amarelas). Em imagens de alta resolução, tais como aquelas usadas no nosso projeto, marcas de rodovias são linhas brancas finas com um certo comprimento. Os pontos de passagem de pedestres são mostrados como faixas amarelas. No que se refere à obtenção de rodovias, marcas de rodovias fornecem a direção da rodovia e freqüentemente a sua linha central, enquanto as faixas de passagem de pedestres definem a largura local da rodovia. As faixas podem ser

usadas para direcionar o processo de obtenção de rodovias ou para verificar os resultados de extração. Adicionalmente em muitos casos as linhas centrais de rodovias podem ser derivadas diretamente de marcas de rodovias presentes e/ou de faixas de passagem de pedestres. Isto é especialmente útil quando as laterais das rodovias estão oclusas ou não bem definidas, tal como em cidades ou em centros urbanos. A seguir descrevemos os métodos que desenvolvemos para obter marcas de rodovias em 3D e as informações de faixas de passagem de pedestres: o centro dessas faixas, o eixo menor (direção local da rodovia) e o eixo maior (largura local da rodovia). Observe que, com o conhecimento existente tal como o MDT, VEC25 e informações derivadas do processamento de imagem tal como o MDS e dados de classificação de imagem, o processamento pode ser focado na superfície da rodovia, dentro do *buffer* de erro do VEC25.

Considerando que marcas de rodovias são geralmente brancas, a imagem é inicialmente segmentada por limiarização em canais R, G, e B. As marcas de rodovias são então obtidas usando um modelo de linha de imagem e a descrição geométrica de cada marca de rodovia é obtida. A forma de uma linha de imagem pode ser apresentada como um polinômio de segunda ordem (Haralick et al., 1983; Busch, 1994). Podemos computar a direção local da linha a usando este modelo. Então, obtemos o perfil na direção perpendicular a  $\alpha$ . O perfil pode ser descrito como uma parábola. Assim, a posição precisa de cada ponto de linha é obtida do perfil. Os pontos de linha detectados com direção similar e com a segunda derivada direcional estão conectados. Os detalhes do algoritmo e a sua implementação podem ser encontrados em Zhang et al. (2001a). Linhas retas são obtidas pelo ajuste dos mínimos quadrados. As linhas 3D são geradas pelo método de justaposição estrutural que desenvolvemos. As linhas 3D são

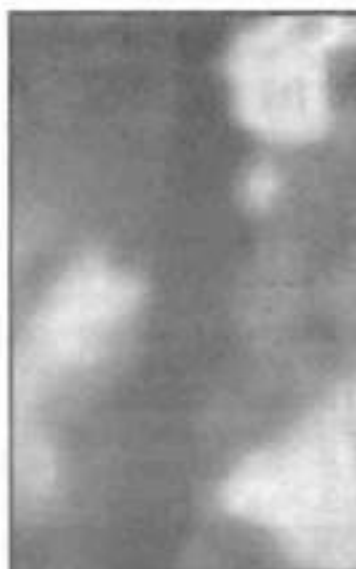


Fig. 7.4 Subtração do MDT (modelo digital de terreno a partir do MDS - modelo digital de superfície)

então avaliadas usando conhecimentos; somente aquelas no solo (conforme definido por MDS-MDT) pertencentes a regiões de rodovias (conforme determinado pela classificação) e no *buffer* definido por VEC25 são mantidas como marcas de rodovias detectadas.

As faixas de passagem de pedestres são compostas por diversas faixas finas. Novamente, usando informações de cores, a imagem é segmentada. O fechamento morfológico é aplicado para fechar os vazios entre as faixas de passagem de pedestres. Obtemos então diversos agrupamentos por rotulagem conectada. Somente os agrupamentos com um certo tamanho são mantidos enquanto os menores são descartados. Os agrupamentos retangulares são selecionados como faixas de passagem de pedestres. O centro, os eixos curtos e longos das faixas de passagem são computados usando momentos espaciais.

A Fig. 7.5 é um exemplo de obtenção de marca de rodovia e de faixa de passagem de pedestres. As marcas de rodovias obtidas são mostradas em linhas pretas superimostas na imagem. O centro, os eixos curto e longo das faixas de passagem de pedestres detectados também são apresentados.



Fig. 7.5 Obtenção de marca de rodovia e de faixa de passagem de pedestres

#### 7.4 Reconstrução de Rodovia com Base em Conhecimentos: Combinação de Indícios

Por meio da informação obtida de dados espaciais existentes e de processamento de imagem, a base de conhecimentos é estabelecida de acordo com a estratégia geral. O sistema então obtém rodovias, encontrando bordas paralelas 3D que pertencem a bordas da rodovia e as conectam em seqüência. No caso de sombras, oclusões causadas por árvores e construções etc., um processo de raciocínio é ativado, usando a base de conhecimento. Assim sendo, também naqueles casos quando somente um ou nenhum lado é visível, pode freqüentemente ser manipulado pelo sistema. Os principais procedimentos são descritos a seguir.

O sistema verifica as bordas obtidas para encontrar bordas paralelas em 3D. Somente bordas localizadas no *buffer* definidas por VEC25, tendo uma orientação similar a segmentos VEC25 e uma certa inclinação, são processadas adicionalmente. Já que as rodovias estão no solo, as bordas acima do solo são removidas por meio da verificação com o MDT. Por meio da verificação com os resultados da classificação de imagem, uma relação com a região da rodovia (dentro, do lado de fora, na borda) é conectada a cada borda. Duas bordas são consideradas como paralelas se ambas possuírem orientação similar no espaço 3D. As bordas de um par precisam estar sobrepostas na direção ao longo das bordas e a distância entre elas deve estar

numa certa faixa. As distâncias mínimas e máximas dependem da classe de rodovia dentro de uma certa faixa. As distâncias mínima e máxima dependem da classe de rodovia definida em VEC25. As bordas paralelas 3D encontradas são projetadas sobre as imagens e avaliadas usando múltiplos conhecimentos. A região entre as bordas projetadas precisa pertencer à classe "Rodovia" conforme determinado pela classificação da imagem. Se marcas de rodovias são apresentadas nessa rodovia, as marcas de rodovia obtidas são usadas para confirmar que o par de bordas corresponde aos lados corretos da rodovia.

A cada par 3D encontrado de bordas paralelas o sistema tenta estender ao máximo possível, usando informação de borda 3D e 2D, sendo que para cada extensão, um processo de raciocínio é ativado para garantir que a área de extensão seja uma seção de rodovia e que as bordas estendidas sejam lados da rodovia. Os procedimentos são mostrados na Fig. 7.6. Usamos maiúscula para representar segmentos de borda 3D e minúscula para segmentos de borda 2D. Suponhamos que *ef* seja uma borda reta 2D e que *eg* esteja oclusa na outra imagem. Então, somente podemos gerar uma borda reta 3D para o segmento *gf*, que é mostrado como *AB* na figura. *CD* é outra borda reta 3D paralela à *AB*. A região 1 é a área de sobreposição de *AB* e *CD* e o sistema acha que esta área pertence à rodovia. Assim sendo, a área de sobreposição é estendida adicionalmente a *C'* enquanto a região 2 também for rodovia. Uma vez que o sistema encontre uma certa confiança que *AB* é o lado correto da rodovia, a região 3 será verificada, mesmo que não haja nenhuma informação 3D para o segmento *eg*. Se a região 3 também for uma rodovia, a área de sobreposição é adicionalmente estendida para *C''*. A informação 3D do ponto *e* é obtida pela interseção do raio da imagem passando por meio de *e* e a borda *AB* 3D. Este procedimento é conduzido para os segmentos *AB* e *CD* 3D e suas bordas planas 2D correspondentes em ambas as imagens, até que não seja possível encontrar uma extensão em 3D e 2D. A Fig. 7.7 é um exemplo de extensão de bordas paralelas. A linha branca são bordas planas. O par de bordas paralelas 3D encontrado é mostrado em linhas pretas sólidas. O par paralelo em linhas pontilhadas pretas é gerado por extensão usando uma borda reta 3D, enquanto o par paralelo em linhas pontilhadas cinza (na parte inferior esquerda) é gerado por extensão usando uma borda reta 2D.

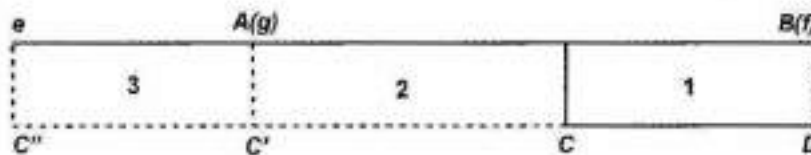
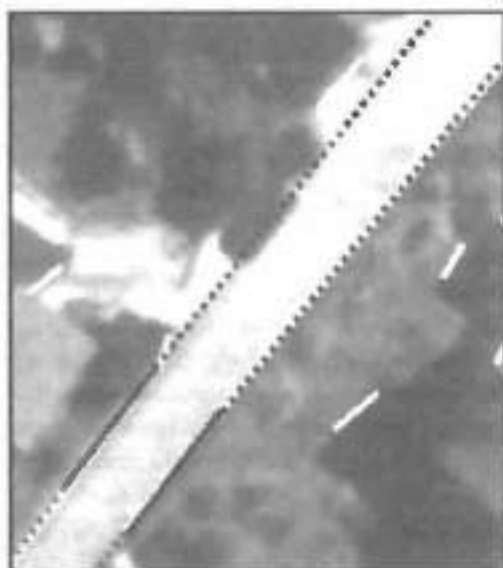


Fig. 7.6 Extensão de bordas paralelas

O sistema também controla cada borda plana 3D individualmente, se esta borda pertencer a qualquer par 3D paralelo. Quando um dos lados da borda for rodovia, o sistema levanta a hipótese sobre seu lado oposto, usando a largura de bordas paralelas 3D já encontrada. Novamente, a área sob hipótese é controlada, usando o conhecimento acumulado. Em comparação com bordas paralelas 3D visíveis, o sistema aloca uma baixa confiança à paralela hipotética. No caso em que a borda visível simples está próxima a uma borda de um par paralelo 3D encontrado e que tenha uma orientação semelhante, a sua confiança é aumentada.



**Fig. 7.7** Exemplo de extensão de bordas paralelas

possibilidade do vazio pertencer à rodovia. Isto é denominado de "processo de raciocínio" no nosso trabalho. Se o vazio não for longo demais e:

- dentro do vazio houver uma região de rodovia, ou
- dentro do vazio houver uma sombra ou sombra misturada com região de rodovia, ou
- o vazio é causado por oclusão de árvore (determinada pelos resultados de classificação da imagem e do MDS-MDT), ou
- dentro do vazio o terreno for determinado pelo MDS-MDT ou,
- marcas de rodovia forem obtidas de dentro do vazio, então consideramos que o vazio possivelmente pertença a uma rodovia. Suponha que  $N$  é o número total de *pixels* no vazio e que  $N_r$  e  $N_s$  são números de *pixels* de rodovia e de sombra respectivamente. A possibilidade de um vazio (*gap*) pertencer a uma rodovia é computado como  $P_g = S_g * S_p$  onde  $S_g$  e  $S_p$  são medidas usando respectivamente a altura e informação de imagem. São dados como:

$$S_g = \frac{\sum \left( 1 - \frac{MDS-MDT}{T} \right)}{N}, \quad S_p = \frac{N_r + N_s}{N}$$

onde  $T$  é usado para compensar os erros em dados de DTM e DSM.

A rodovia então é encontrada pela pesquisa do gráfico, usando o método melhor-primeiro. O método maximiza o comprimento enquanto minimiza a curvatura total numa função de mérito. A função é definida como um somatório ponderado de medição paralela

Todas as bordas paralelas encontradas são consideradas como "possíveis lados de rodovia que estão paralelos" (PRSP). Eles compõem um gráfico ponderado. Os nós do gráfico são PRSPs, os arcos do gráfico são as relações entre PRSPs. Observe que em áreas de oclusão, os arcos também representam as partes que faltam de uma rodovia entre um par de PRSPs. A largura de dois PRSPs deve ser igual. Se não houver espaçamento entre dois PRSPs, isto é, um PRSP possui pontos comuns com outro e os ângulos de conexão entre eles no espaço 3D obedecem aos de VEC25, então estão conectados diretamente. No caso de existir um vazio, inicialmente verificamos os ângulos de conexão entre PRSPs e o vazio. Se os ângulos concordarem com aqueles do VEC25, a área do vazio (*gap*) é mais detalhadamente avaliada usando informação adicional e computamos a

para PRSP, medição de informação de imagem para o PRSP e o *gap*, medição de semelhança de largura entre PRSPs e medição de conexão geométrica entre PRSPs.

Para rodovias principais, nas quais o sistema sabe que as marcas de rodovia estão presentes, com base em suas classes, o sistema também obtém rodovias usando marcas de rodovias e faixas para o cruzamento de pedestres detectados. As marcas de rodovias são conectadas usando um método semelhante com o descrito no parágrafo anterior. Este procedimento aumenta a eficiência e a confiabilidade do nosso sistema. Em áreas complexas, tais como centros urbanos maiores, os lados da rodovia estão geralmente muito oclusos e às vezes é impossível identificá-los. Não obstante, as linhas centrais das faixas de rolagem de rodovias são obtidas com sucesso pelo sistema usando marcas de rodovia. Em áreas rurais e suburbanas, a rodovia obtida usando marcas de rodovia é usada pelo sistema para verificar os resultados de obtenção de bordas paralelas 3D.

O passo final de obtenção de rodovias é a geração da rede de rodovias. Herdamos a topologia da rede de rodovias do VEC25 e assim sabemos quantas e quais rodovias chegam a uma junção de rodovias e o nosso sistema obtém as rodovias de uma junção à outra. Uma vez que as rodovias em volta de uma junção forem determinadas, a junção será reconstruída pela extensão e intersecção de rodovias.

## 7.5 Resultados

O sistema descrito foi implementado como um pacote de software dedicado com uma interface gráfica para o usuário, operando em plataformas SIG. O sistema lê a imagem estereoscópica colorida, a base de dados das velhas rodovias e outros dados de entrada e apresenta como saída as rodovias obtidas no formato *Shapefile 3D* que é facilmente importado pelo software de SIG existente. Testamos o sistema num certo número de imagens. Serão apresentados alguns resultados experimentais da obtenção de rodovias.

A Fig. 7.8 apresenta a obtenção 3D de segmentos de rodovia em duas áreas-teste. Cada área cobre uma porção de uma imagem estereoscópica (apenas a imagem esquerda é mostrada). A paisagem da Fig. 7.8a inclui áreas abertas rurais, florestas e cidades, enquanto a Fig. 7.8b é essencialmente uma cena rural. Quase todas as classes de rodovias na Suíça podem ser encontradas nas duas áreas-teste. Na Fig. 7.8a há aproximadamente 750 rodovias (totalizando cerca de 750 km) na área de cobertura das imagens estereoscópicas. Em ambas as áreas-teste, todas as rodovias e junções em áreas rurais foram obtidas corretamente e com confiabilidade, enquanto em áreas rurais algumas rodovias não foram completamente determinadas devido à elevada complexidade das cenas, requerendo assim interações manuais. Os detalhes da obtenção automática de rodovias em 3D e a geração de junções são apresentados na Fig. 7.9, onde as rodovias desatualizadas de VEC25 são apresentadas em branco e as rodovias obtidas em preto. As Figs. 7.9a e 7.9b são exemplos de obtenção de rodovias e de geração de junções em áreas rurais. Na Fig. 7.9c mostramos a rodovia obtida numa área suburbana. A Fig. 7.9d mostra uma rodovia com 4 pistas de rolamento. O sistema obteve as linhas limítrofes da pista e os centros da pista, por meio da determinação de marca da rodovia, obtendo assim não somente a geometria da rodovia, mas também os seus atributos. Mais exemplos de obtenção de rodovias em 3D podem ser encontrados em Zhang et al. (2001a e 2001b).

Para avaliar os resultados de extração, foi desenvolvido um método que compara as rodovias extraídas com dados de referência. Os dados de referência foram medidos pelo Serviço



**Fig. 7.8** Áreas-teste e rodovias 3D extraídas e rede de rodovias. As rodovias extraídas são mostradas em preto



**Fig. 7.9a e 7.9b** Extração de rodovia e geração de junção em áreas rurais; **7.9c)** extração de rodovias em área suburbana; **7.9d)** linhas limítrofes de pistas de rolamento extraídas e linhas do centro de pistas de rodovia por meio da extração de marca da rodovia

Federal de Topografia Suíço (L + T) numa *plotter* analítica. O método casa os vértices de rodovias extraídas aos dados de referência e calcula diferenças de coordenadas. Os resultados comparativos de 720 vértices estão listados na Tab. 7.1. Os vértices dos dados de referência também foram casados às rodovias extraídas, os resultados porém são similares a aqueles da Tab. 7.1.

**Tab. 7.1** Estatística das diferenças absolutas (em metros) entre rodovias extraídas e dados de referência

ESTATÍSTICA	MÁXIMO	MÉDIA	RMS
DX	1,42	0,32	0,37
DY	1,14	0,20	0,21
DZ	2,37	0,36	0,51

## 7.6 Discussão e Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um sistema de análise de imagem baseado em conhecimentos para a extração de rodovias de fotografias aéreas coloridas estereoscópicas. O sistema possui várias vantagens sobre outras abordagens. Ele usa o conhecimento existente, o contexto da imagem, regras e modelos para restringir o espaço de pesquisa. Trata cada subclasse de rodovia de modo diferenciado, verifica a plausibilidade de múltiplas hipóteses possíveis e, por isso, fornece resultados confiáveis. O sistema contém um conjunto de ferramentas de processamento de imagem para obter vários indícios sobre a existência de rodovias e funde múltiplos indícios e fontes de informações existentes. A fusão fornece não somente informação complementar, mas também informação redundante para registrar erros e resultados incompletos. Trabalhando em imagens estereoscópicas, o sistema faz uma transição inicial de espaço de imagem 2D para espaço de objeto 3D. A hipótese de rodovia é gerada diretamente em espaço de objeto 3D. Isso não somente nos permite aplicar mais critérios geométricos para criar hipóteses, mas também reduz drasticamente o espaço de pesquisa e aumenta a velocidade do processo. As hipóteses são avaliadas em imagens usando informação de conhecimento acumulada. Quando quer que características 3D estejam incompletas ou faltando inteiramente, informações 2D de imagens estereoscópicas são usadas para inferir as características faltantes. Incorporando múltiplos conhecimentos, as áreas problemáticas ocasionadas por sombras, oclusões etc. podem ser freqüentemente manuseadas. Com base em rodovias extraídas, as junções de rodovias são geradas e assim o sistema fornece uma rede rodoviária atualizada para usos práticos. Apresentamos também neste capítulo os resultados de extração de rodovias em diferentes paisagens e a análise quantitativa usando dados de referência precisos. A comparação das rodovias reconstruídas com tais dados, mostrou que os resultados preenchem as exigências de exatidão especificadas. Atualmente estamos trabalhando na derivação de critérios de confiabilidade para a extração de resultados. O nosso trabalho futuro será concentrado na extração de rodovias em cidades e centros urbanos.

## 7.7 Agradecimentos

Agradecemos pelo suporte financeiro a este trabalho e ao projeto ATOMI fornecido pela Agência Federal Suíça de Topografia, em Berna.



## 7.8 Referências Bibliográficas

- AIRAULT, S.; JAMET, O.; LEYMARIE, F. From manual to automatic stereoplotting: evaluation of different road network capture processes. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 31, part b3, pp. 14-18, 1996.
- BALTSAVIAS, E. P. *Multiphoto geometrically constrained matching*. PhD Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, report n. 49, 1991.
- BAUMGÄRTNER, A.; HINZ, H. Multi-scale road extraction using local and global grouping criteria. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, part b3 (1), pp. 58-65, 2000.
- BUSCH, A. Fast recognition of lines in digital images without user-supplied parameters. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 30, part 3 (1), pp. 91-97, 1994.
- EIDENBENZ, Ch.; KAESER Ch; BALTSAVIAS, E. ATOMI – Automated reconstruction of topographic objects from aerial images using vectorized map information. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, part b3 (1), pp. 462-471, 2000.
- FOERSTNER, W.; PLUEMER, L. (Ed.) *Semantic modeling for the acquisition of topographic information from images and maps*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1997.
- GRUEN, A.; KUEBLER, O.; AGOURIS, P. (Ed.) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
- GRUEN, A.; BALTSAVIAS, E. P.; HENRICSSON, O. (Ed.) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II)*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1997.
- GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 63, n. 8, pp. 985-995, 1997.
- HARALICK, R. M.; WATSON, L. T.; LAFFEY, T. J. *The topographic primal sketch*. Int. J. Robotics Research, v. 2, n. 1, pp. 50-72, 1983.
- HENRICSSON, O. *Analysis of image structure using color attributes and similarity relations*. PhD Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Report Nr. 59, 1996.
- JAIN, A. K.; DUBES, R. C. (Ed.) *Algorithms for clustering data*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1988.
- McKEOWN, D. M.; DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: *Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 662-672, 1988.
- RUSKONE, R. *Road network automatic extraction by local context interpretation: application to the production of cartographic data*. PhD. Thesis Marne-La-Vallee University, 1996.
- VOSELMAN, G.; GUNST, M. Updating road maps by contextual reasoning. In: GRUEN, A.; BALTSAVIAS, E. P.; HENRICSSON, O. (Ed.) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 267-276, 1997.
- WANG, Y.; TRINDER, J. Road network extraction by hierarchical grouping. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, part b3 (2), pp. 943-949, 2000.
- ZHANG, C.; BALTSAVIAS, E. Knowledge-based image analysis for 3D edge extraction and road construction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, part b3 (2), pp. 1008-1015, 2000.
- ZHANG, C.; BALTSAVIAS E.; GRUEN, A. Knowledge-based image analysis for 3D road reconstruction. *Asian Journal of Geoinformatic*, v. 1, n. 4, pp. 1-14, 2001a.
- ZHANG, C.; BALTSAVIAS, E.; GRUEN, A. Updating of cartographic road database by image analysis. In: BALTSAVIAS, E. P.; GRUEN, A.; GOOL, L. V. (Ed.) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III)*. Lisse: A. A. Balkema Publishers, pp. 243-253, 2001b.

## Mapeamento Operacional de Tipos de Biótopos com Dados do HRSC - Problemas e Concepções de Solução

Cornelia Leser

### 8.1 Introdução

Na área de planeamento regional e de meio-ambiente aumenta a demanda por dados anuais sobre os estandes vegetais, para a execução de planeamentos e para o controle de sua execução. Além disso, objetivos nacionais na área de proteção ambiental bem como acordos internacionais exigem, para a proteção de ambientes naturais, o desenvolvimento de métodos mais eficientes para acessar e observar tipos de biótopos e de uso.

O mapeamento de biótopos ocorre em escalas comparativamente grandes (1:10.000). Para tanto, o mapeamento em campo, dependente de muito pessoal e tem altos custos, por isso já foi substituído pela interpretação visual de fotografias aéreas infravermelho coloridas que é reduzida a setores e áreas-amostrais a serem analisadas com muito detalhe. As possibilidades de aplicação de dados de satélite, cuja resolução geométrica, especialmente nos canais multiespectrais é relativamente pequena, são limitadas aos mapeamentos em grande escala, para responder a questões específicas de proteção ao meio ambiente (Kenneweg et al., 2000; Pilarski e Schmidt, 2000:139 in Wiegand et al. (ed.), Frietsch, 1999:24).

Os dados digitais HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) de scanner aerotransportado satisfazem aos requisitos necessários para tarefas automatizadas de sensoriamento remoto, referentes à detecção e ao monitoramento em grandes escalas, pois devido à sua elevada resolução geométrica no solo(1) eles dispõem, em relação à fotografia analógica clássica, de um foco de detalhe comparável e uma precisão da posição geométrica(2) muito elevada, que é absolutamente necessária para obterem-se sobreposições areolares nítidas em Sistemas de Informações Geográficas. Os produtos do sistema HRSC incluem dados de orto-imagens pancromáticas e multiespectrais(3), bem como um Modelo Digital de Terreno (Lehmann, Pischel e Wewel, 1999: 1ff, Albertz, Gwinner e Lehmann, 2000:63). Estes dados são adequados para a interpretação visual e para as análises automáticas. A concepção totalmente digital e automatizada da obtenção de imagens pelo HRSC e o trabalho fotogramétrico permitem um rápido processamento dos grandes volumes de dados que resultam dos vôos de imageamento (Wewel e Scholten, 2000:57).

---

(1) Num altitude de vôo de 2.500 m a resolução no solo é de 10 cm (Lehmann et al., 1999:1)

(2) A precisão fotogramétrica é de 15-20 cm lateral e vertical, em relação à orientação externa absoluta (Lehmann et al., 1999:1)

(3) O imageamento é efetuado com diferentes visadas simultaneamente na faixa espectral óptica (canais azul, verde, vermelho bem como em cinco canais pancromáticos), e no canal infravermelho próximo.

Este capítulo resume os resultados parciais que, no âmbito de um projeto de dissertação de doutorado na DLR - Berlim (Agência Espacial Alemã), foram obtidos objetivando analisar as possibilidades de aplicação, atualmente disponíveis com os dados do scanner aerotransportado HRSC, para o mapeamento operacional de biótopos(4) e que seja essencialmente automatizado. De início, são abordados os problemas fundamentais do mapeamento operacional e automatizado de biótopos. A seguir, são formuladas possíveis soluções. Os exemplos de imagens do HRSC-A são recortes da área de proteção ambiental, Ilha Pagensand do rio Elbe, que foi escolhida como área teste para as pesquisas.

## **8.2 Problemas Fundamentais que até o Momento Impedem um Mapeamento Operacional de Biótopos**

Atualmente ainda se opõem problemas complexos ao desenvolvimento de um método essencialmente automatizado que corresponda às necessidades e que possa ser transferido a outras áreas, para acessar os tipos de biótopos e o seu uso. Alguns problemas são de solução rápida, como p. ex. quando se trata de diferenças regionais de sistematização (catalogação e tipificação) dos biótopos de interesse (item 8.2.1). Outros, porém, são mais complicados, como p. ex. na procura de métodos práticos da retificação radiométrica geral dos dados de saída (item 8.2.2), ou em instrumentos de interpretação confiáveis, adequados ao conteúdo de informação do material de imagem obtido (item 8.2.3).

### **8.2.1 Inexistência de padronização na área de catalogação dos tipos de biótopos e tipos de uso**

Os esforços abrangentes, porém específicos e diferenciados nos Estados da Alemanha para a catalogação e mapeamento de biótopos e tipos de biótopos, resultaram nas últimas décadas(5), numa aproximação unitária e padronizada no nível federal. De modo geral, são efetuados mapeamentos de biótopos selecionados que se limitam a regiões merecedoras de proteção (p. ex. o mapeamento conforme §-24<sup>3</sup> no Estado de Baden-Württemberg) e a mapeamentos de biótopos que cobrem Estados inteiros da federação (Knickrehm e Rommel, 1995:519, p. ex. os Estados de Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt). Trata-se aqui porém de uma subdivisão ideal-típica, visto que na prática diversas variáveis são aplicadas (520: op. cit.).

Em razão dos métodos de levantamento e catalogação específicos dos Estados, os resultados no que se refere à sua resolução temática e espacial não são diretamente comparáveis (BfN, 1996:69, Röser, 1990:15). A Agência Federal de Proteção à Natureza (Bundesamt für Naturschutz) publicou uma introdução ao mapeamento visando uma unificação, em todo o país, do mapeamento dos biótopos (BfN, 1995) e a introdução de padrões suprarregionais aos principais questionamentos (O que mapear e de que forma?), permitindo a comparação

---

(4) Uma metodologia para o mapeamento operacional de biótopos através de técnicas de SR deve satisfazer aos seguintes critérios: delimitação e classificação confiável dos biótopos de interesse, possibilidade de transferência das seqüências de classificação do mapeamento inicial para dados de outras missões de imageamento (mapeamentos posteriores), possibilidade de automação praticamente completa e a quase não necessidade de conhecimentos especializados nos mapeamentos subsequentes.

(5) O mapeamento de biótopos é executado desde 1974 nos antigos Estados da federação e a partir de 1990 (após a reunificação alemã) nos novos Estados da federação (Raffelsiefer, 2000:15).

de resultados, tornando-os mais atrativos para o processamento em Sistemas de Informações Geográficas.

Sobre a velocidade de isso vir a se estabelecer na prática é uma questão aberta, visto que as Agências Ambientais Estaduais Alemãs já possuem introduções ao mapeamento individualmente preparadas e validadas especificamente para os biótipos que ocorrem nos respectivos Estados.

### 8.2.2 O problema da padronização das características do material dos dados de saída

Os níveis de cinza de dados de imagens produzidos por SR não são diretamente proporcionais à densidade de radiação, ou seja ao grau de reflectância da superfície do terreno. As principais causas das distorções radiométricas nas imagens obtidas são: variações da posição do Sol, desníveis do terreno, reflectâncias dependentes da direção da superfície terrestre, absorção e difusão na atmosfera, graus de transmissão dependentes da direção na óptica do sensor, bem como sensibilidades não lineares e variáveis do detector (Kraus, 1990:464). Estas influências, na prática, somente poderão ser eliminadas por aproximações através de retificações geométricas. Uma determinada constância dos dados do material de saída no que se refere aos níveis de cinza lá encontrados é uma premissa básica para que seqüências de interpretação de dados sejam diretamente transmitidas às missões de imageamento posteriores, ou seja, que permitam a sua comparação automática dentro de diferentes períodos de imageamento.

Para poder minimizar distorções radiométricas através de cálculos de equalização, precisam ser conhecidos, em grande quantidade, coeficientes específicos da condição de imageamento. O levantamento destes coeficientes está associado a um grande volume de trabalho, a ser executado paralelamente ao imageamento, incluindo medições amostrais terrestres e não terrestres bem como avaliações com base em modelos da atmosfera. As distorções radiométricas ocorridas por causa da não linearidade do detector precisam ser reduzidas através de calibração radiométrica feita periodicamente no sistema imageador.

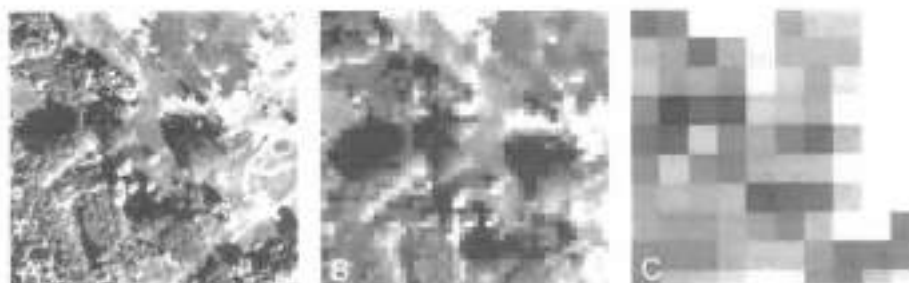
Enquanto não for encontrado um método operacional, suficientemente exato e confiável para uma retificação radiométrica geral, grandezas dependentes de níveis de cinza precisam ser ajustadas interativamente nas seqüências de classificação após cada novo imageamento.

### 8.2.3 Instrumentos de interpretação utilizáveis só condicionalmente

O grau de detalhamento espacial extremamente elevado dos dados do HRSC, quando comparados a dados obtidos de satélite, está associado a um enorme ganho em informações detectáveis visualmente e também a classes diferenciáveis informalmente(6), ou seja a classes temáticas. Elevada também é a gama das assinaturas espectrais registradas por unidade de superfície observada, originada por condições de iluminação(7) localmente variáveis e pelos valores de reflectância correspondentes (Fig. 8.1).

(6) Classes informais são as classes temáticas de acordo com o objetivo da interpretação, que precisam ser geradas a partir da classificação das classes espectrais (Campbell, 1996: 315).

(7) Valores de reflectância fortemente variáveis dentro das mesmas classes de cobertura do solo são originados p. ex. em razão dos efeitos de excessiva radiação local ou por efeitos de sombra.



**Fig. 8.1** O mesmo recorte de imagem é apresentado três vezes, com três tipos de vegetação: grupos de arbustos caducifólios, arbustiva mista e áreas com gramíneas magras: imagem HRSC-A aqui com 30 cm de resolução dos canais multiespectrais (A), resolução simulada de 4 m dos canais multiespectrais do Ikonos (B) e resolução simulada de 23 m dos canais IRS-1C-LISS. Fica clara a relação entre a resolução espacial, o número das classes temáticas diferenciáveis e o número de níveis de cinza diferentes por unidade de superfície.

Isto dificulta a utilização padronizada de instrumentos de interpretação orientados a *pixels*, que foram concebidos para a interpretação de dados de satélite, nos quais a variação dos valores de reflectância ocorre num espaço muito pequeno, por causa da reduzida resolução geométrica e se fundem num valor mediano do *pixel*, típico para aquela classe.

Para a avaliação sobre a adequação dos métodos de interpretação baseados em *pixels*, foram testados classificadores que trabalham tanto de modo supervisionado como não supervisionado, tendo diferentes dados de entrada(8). De modo geral, os resultados da classificação no entanto foram insatisfatórios no que se refere ao objetivo proposto. Caracterizaram-se por ruídos(9) *pixel a pixel* com uma elevada porcentagem de pontos da imagem erroneamente classificados e por um número pequeno demais de classes informais seguramente diferenciadas (Fig. 8.3C).

Para estar à altura de questionamentos mais complexos como o mapeamento de todos os biótopos e tipos de uso de uma dada região, há a necessidade de seqüências de classificação complicadas, nas quais as camadas de entrada são usadas num grande número de máscaras e classificadas hierarquicamente (Gähler et al., 2001). Por outro lado é muito elevada a complexidade de tais seqüências de classificação, não permitindo nenhuma transferência direta para outras regiões de estudo e para outras missões de imageamento (*op. cit.*)

Mais promissores na área da análise digital de dados de SR de alta resolução são aqueles instrumentos de interpretação, que procuram acessar os dados de imagem como objetos "realistas". Nestas concepções de classificação(10) orientadas a objetos, o ruído *pixel a pixel*

(8) Canais multiespectrais e canal pancromático do HRSC-A, camadas calculadas a partir da transformação de principais componentes de diferentes canais do HRSC-A, camadas de textura com filtragem de variância.

(9) Métodos de análise orientados a *pixels* levam especialmente na interpretação de dados de imagem de resolução muito alta a um ruído fortemente comprometedor do tipo "sal e pimenta" no resultado da classificação (Blaschke, 2000:30).

(10) Aqui foi testado o pacote de software eCognition (fabricado pela Definiens AG), que está disponível desde o final do ano 2000. Foram utilizados todos os canais multiespectrais HRSC-A, bem como o canal nadir pancromático. Para a interpretação das informações de altimetria foi utilizado ao invés do modelo digital de terreno um modelo de altimetria de vegetação derivado do mesmo.

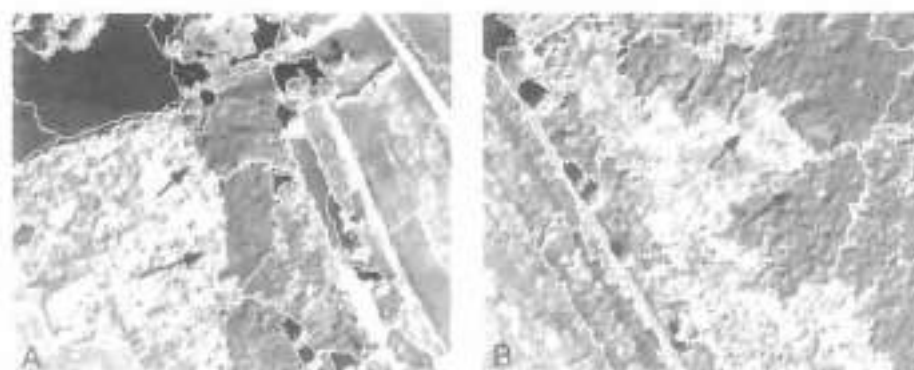
no resultado de classificação é por um lado evitado, visto que ao invés de *pixels* individuais, são observados grupos de *pixels* homogêneos (segmentos), resultando daí novos problemas relacionados à formação do objeto.

A precisão da classificação e a acuidade de separação a serem obtidas através da interpretação orientada a um objeto, dentro das classes temáticas desejadas, depende inicialmente de uma segmentação com sucesso. O procedimento de segmentação junta *pixels* unitários em grupos de *pixels* ou segmentos, segundo determinados critérios de homogeneidade, no que se refere às suas assinaturas espectrais. Aqui, no entanto, permanece o problema mencionado na avaliação *pixel a pixel* no que se refere aos valores de reflectância em parte fortemente variável dentro do mesmo tipo de biótopo e uso, de modo que os limites dos segmentos nem sempre possuem um percurso tematicamente adequado.

Apesar da opção de acessar objetos diferentemente grosseiros, ou seja, finos em diferentes planos de segmentação, a procura de um resultado de segmentação satisfatório areolarmente demonstrou ser uma tarefa extremamente difícil e, em parte, até sem solução: alguns tipos de biótopos e usos com assinatura espectral muito parecida, não puderam ser delimitados um do outro com confiabilidade.

A segmentação de dois tipos deu certo num ponto ao passo que, em outro no mesmo procedimento de segmentação, o resultado foi insatisfatório (Fig. 8.2). Também foi difícil a segmentação de biótopos que apresentavam limites graduais em amplos setores de transição, ou seja, sem limites exatos. No entanto, este problema ocorre da mesma forma em qualquer tipo de interpretação (mapeamento no campo/interpretação visual/delimitação automática). Em consequência disso, não se podem esperar resultados objetivamente corretos e infalíveis de uma segmentação automática orientada com poucos parâmetros de comparação.

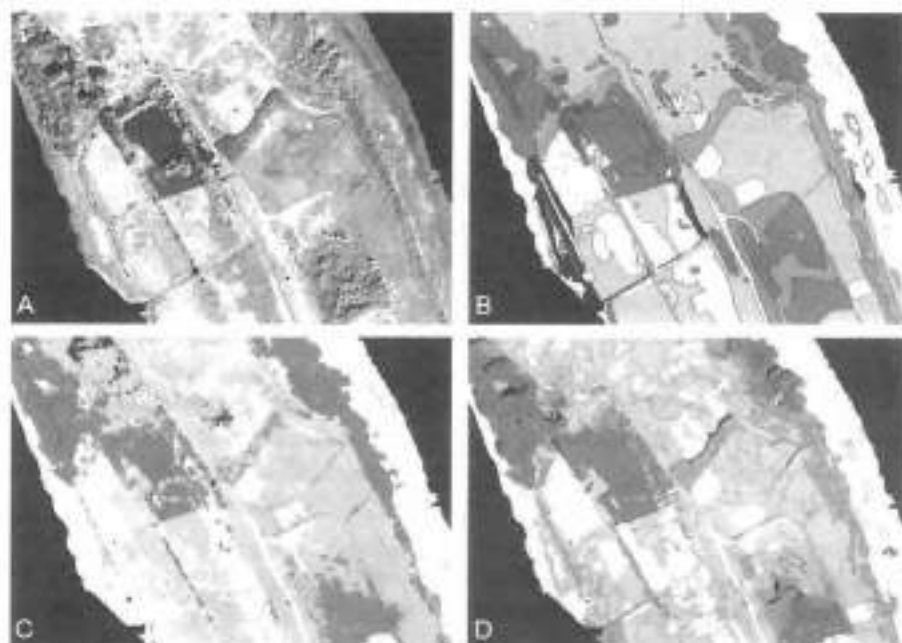
Ao lado de limites de segmentos tematicamente insatisfatórios, formaram-se também segmentos pequenos e fractais, que delimitam especialmente estas áreas de transição. Nestes casos houve grandes problemas na posterior classificação, já que as características dos objetos destes segmentos de uma composição muito heterogênea não puderam ser associados a nenhuma das descrições de classe.



**Fig. 8.2** Segmentação realizada com sucesso (B) e sem sucesso (A) de vegetações arbustivas rasteiras dentro da mesma seqüência de segmentação e conjunto de dados

De modo geral, a segmentação permanece sendo um processo cuja saída não é totalmente previsível e que nunca pode ser repetido de forma totalmente idêntica. Especialmente para tarefas de monitoramento, a falta de reprodutibilidade não permite uma comparação quantitativa exata em área dos valores dos estandes de tipos de biótopos e de uso individuais.

A estruturação das regras de classificação para os segmentos formados também pode tornar-se um longo processo: se a área de pesquisa tiver uma composição muito heterogênea, poucas estratégias de classificação acertadas à constituição específica da área de pesquisa podem levar ao objetivo. Até que a estratégia adequada seja encontrada, frequentemente a "hierarquia de classes" precisa ser revista ou modificada. Aqui qualquer modificação nos planos de hierarquia superiores está sempre associada com a correspondente reordenação das classes pretendidas em outros planos posteriores. Objetos delimitados tematicamente de modo insatisfatório são classificados erroneamente ou permanecem não classificados. A Fig. 8.3D mostra um recorte do resultado da interpretação baseada em um objeto que, apesar dos problemas mencionados, é preferível a uma interpretação *pixel a pixel* destes dados de alta resolução.



**Fig. 8.3** Recorte original de imagem HRSC-A, da ilha Pagensand do rio Elbe, (A) com os respectivos resultados da interpretação visual (B) bem como da interpretação automática orientada a pixels: (C) exemplo de classificador de máxima verossimilhança, ERDAS Imagine, (ERDAS Inc.) e das concepções orientadas a objeto (D): eCognition, da Definiens AG)

### 8.3 Concepção da Solução

O complexo assunto de pesquisa mencionado com relação ao mapeamento de tipos de biótopos e de sistemas de seu uso, atualmente não pode ser acessado em seqüências de

classificação, com praticamente "validade geral", visto que as condições de entorno essenciais e que influenciam a interpretação não foram suficientemente padronizadas, ou seja, não são constantes (item 8.2.2).

As seqüências automatizadas de interpretação são sempre oferecidas como soluções únicas, que não podem ser transferidas a outras áreas de estudo e nem a outras missões de imageamento em outras épocas. No caso de se querer desenvolver métodos operacionais no sentido acima mencionado, para que sejam possíveis as transferências mencionadas, certas condições limitantes precisam ser aceitas no que se refere à resolução temática e/ou ao seu grau de automação. Uma concepção de solução atraente e interessante para tarefas de monitoramento em grandes escalas está num compromisso entre automação, condição de transferência para outras áreas e resolução temática.

Para poder usar os promissores instrumentos de interpretação do pacote de software eCognition (Definiens AG, item 8.2.3) de modo operacional, há necessidade de uma otimização da formação do objeto. Os dados da missão de imageamento atuais da área de estudo (Fig. 8.4B) por isso deveriam inicialmente ser somente pré-segmentados (Fig. 8.4D) com base numa camada temática<sup>(11)</sup> (Fig. 8.4A) que delimita os grupos de biótipos e de seu uso, de interesse na área teste (p. ex. área verde, campo agrícola, floresta, arbustiva etc.). Com base nesta segmentação grosseira a área de estudo pode ser pré-classificada, com conhecimento específico, em determinados grupos de biótipos e de uso (Fig. 8.4E), o que ajudará na posterior classificação de diferentes estágios de desenvolvimento e de intensidade de uso.

As mudanças na cobertura do solo causadas ao desenvolvimento e uso e que foram observadas no biótopo na respectiva data da missão de imageamento, são delimitadas posteriormente por uma segmentação fina (Fig. 8.4F). Os segmentos daí gerados, exclusivamente com dados de imagens atuais, permanecem rigorosamente dentro dos segmentos grosseiros produzidos antes e baseados em conhecimentos prévios. Assim, nas faixas de bordas, não são criados segmentos indesejáveis que, do ponto de vista temático, fazem pouco sentido.

Os dados de imagem finamente segmentados são por fim discriminados nas classes informais de interesse, com ajuda de regras de classificação hierarquicamente estruturadas (Fig. 8.4G). Nestas regras, entra o conhecimento "herdado" do grupo de pertinência potencial do biótopo e do uso no plano de segmentação grosseiro sobreposto (Fig. 8.4E). Por outro lado, uma base de conhecimento (Fig. 8.4C) fornece uma indicação sobre o comportamento do nível de cinza dependente do desenvolvimento e uso dos tipos individuais de biótipos. A tarefa da base de conhecimento é traduzir todos os questionamentos interessantes na respectiva área de pesquisa de SR do modo mais simples e de compreensão inequívoca. O resultado da classificação pode ser apresentado sob forma de um mapa temático e como uma tabela estatística sintética (Fig. 8.4H).

Alterações causadas pelo desenvolvimento e utilização nos percursos de limites dos grupos de biótipos e de uso (camada temática) podem ser derivadas e classificadas no plano finamente segmentado – apesar de uma elevada ponderação potencial de pertinência a um

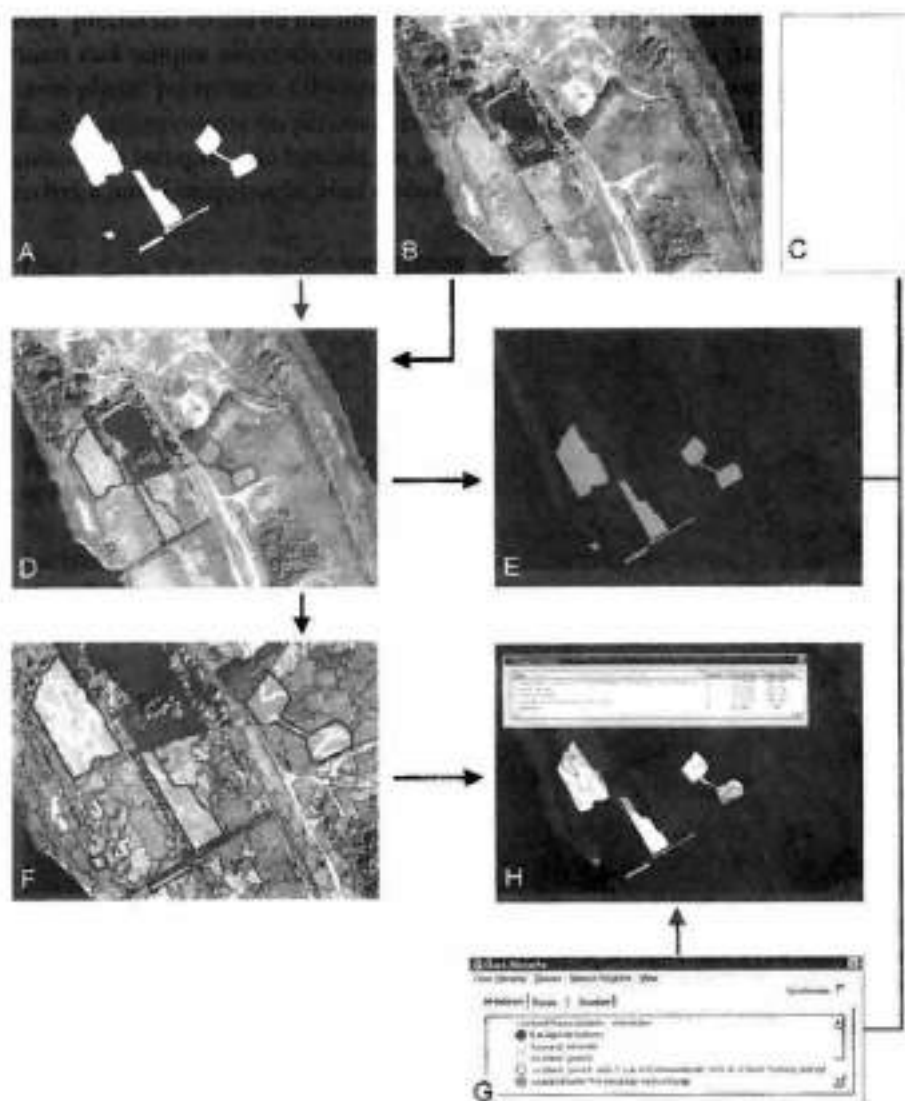
---

(11) A camada temática deve ser, de preferência, o resultado de uma interpretação visual única de dados do HRSC-A, para garantir uma elevada precisão de posicionamento dentre todos os dados de entrada.



grupo – considerando-se as relações de vizinhança. Através de uma nova segmentação baseada neste resultado de classificação e com a posterior fusão de segmentos do mesmo tipo, a camada (*layer*) temática (Fig. 8.4A) pode ser atualizada em caso de necessidade.

Os dados de imagem da próxima missão de imageamento por sua vez serão previamente segmentados com ajuda da camada temática (eventualmente atualizada) em grupos de Biótopos e de Uso e a seguir analisados dentro de segmentos (Fig. 8.4: F, G, H).



**Fig. 8.4** Esquema seqüencial da parte principal da classificação interna de biótopos e seu uso, mostrando aqui o exemplo do mapeamento de diferentes intensidades de uso dentro do grupo biótopo e uso denominado de "área verde" (explicação vide texto)

#### 3.4 Capacidades, Limitações e Potencial de Aplicações da Metodologia

O método apresentado para o mapeamento de tipos de biótipos e de seu uso, deve apoiar tarefas de monitoramento em áreas de estudo cuja estrutura grosseira de grupos de biótipos e de uso já seja conhecida (p. ex. com base na interpretação visual de dados do HRSC em fotos aéreas IV coloridas.).

Não se trata de uma concepção para um mapeamento a partir da "estaca zero". A segmentação prévia, baseada em conhecimentos através de camadas temáticas que ocorrem junto com o registro espacial grosseiro de setores de interesse temático da área de estudo, não deve ser um problema nos Estados da Alemanha, por causa dos mapeamentos areolares de biótipos e de seu uso já disponíveis, visto que aqui o interesse maior está direcionado às comprovações de mudanças do que em mapeamentos novos de fato.

Além disso, a classificação detalhada de diferentes estágios de desenvolvimento, ou seja de intensidade de uso, freqüentemente só é possível quando correlacionada com o mapeamento de tipos de biótipos e de uso espectral e texturalmente muito parecidos, através da divisão grosseira anterior, incluindo a atribuição de grandes pesos no que se refere à sua (provável) pertinência a um grupo de biótipo e de uso.

Nas missões de imageamento posteriores, a base de conhecimento e de camadas temáticas (eventualmente atualizadas e automatizadas) poderá ser novamente utilizada, de modo que só os dados de imagem a serem interpretados precisarão ser imageados novamente. A seguir as faixas de níveis de cinza das regras de classificação precisam ser ajustadas interativamente às características do material de saída, variáveis em cada voo (item 8.2.2).

Para responder a questionamentos em pouco espaço de tempo, de modo eficaz e automaticamente, que, por exemplo, estejam relacionados ao monitoramento de áreas de proteção de FFH (fauna-flora-habitat) ou ao controle de exigências de uso restrito em áreas de proteção à natureza contratadas, é suficiente, com ajuda do método apresentado, estabelecer seqüências específicas para a área de estudos, cuja resolução temática está reduzida à resposta das questões de interesse na respectiva área de estudo.

Ao lado da adequação por princípio do material de saída do HRSC para tais mapeamentos de grande escala, há ainda um fator favorável ao seu uso: o monitoramento de áreas de proteção ambiental, na maioria dos casos, é orientado em sua resolução temática não a uma chave de mapeamento altamente diferenciada, porém aos questionamentos individuais que interessam à área sob proteção, previamente colocados por planos de manejo e desenvolvimento. Estes questionamentos podem freqüentemente ser reduzidos a alguns poucos pontos de enfoque da pesquisa, como p. ex. a avaliação da intensidade do uso da área verde, a condição de áreas verdes úmidas, ao progresso das medidas de reestruturação de florestas visando à diminuição de componentes de coníferas não localizadas adequadamente, a descrição da estrutura da floresta, a condição das bordas da floresta ou a avaliação da situação do conjunto dos biótipos existentes (Hornfeck, 2000). Especialmente no que se refere ao grande número de tarefas de monitoramento, que num futuro próximo deverão constar no relatório obrigatório sobre a situação de FFH, o método proposto, como componente de projetos de monitoramento de longo prazo, parece ser aplicável operacionalmente e destinado a ter sucesso.

## 8.5 Referências Bibliográficas

- ALBERTZ, J.; GWINNER, K.; LEHMANN, H. The "topographic image map fossa di vulcano 1:5.000": a digital mapping approach based on "high resolution stereo camera-airborne" Imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 33, part b4, pp. 62-69, 2000.
- BfN - BUNDESAMT FUER NATURSCHUTZ. (Ed.) Systematik der Biotoypen- und Nutzungstypen-Kartierung (Kartieranleitung). Standard-Biotoypen und Nutzungstypen für die CIR-Luftbild-gestützte Biotoypen- und Nutzungstypenkartierung für die Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, heft 45, Bonn-Bad Godesberg, 1995.
- BfN (Ed.) *Rote Liste gefährdeter Pflanzen Deutschlands*. Schriftenreihe für Vegetationskunde (28). Bonn-Bad Godesberg, 1996.
- BLASCHKE, T. Ohne Salz und Pfeffer – Objektorientierte Bildanalyse – eine Revolution in der Fernerkundung. *GeoBit* 2, 2000, pp. 30-32, 2000.
- CAMPBELL, J. *Introduction to remote sensing*. London, 1996.
- FRIETSCH, G. Ergebnisse der Biotoypen- und Landnutzungskartierung aus CIR-Luftbildern und Nutzungsmöglichkeiten. *Naturschutzarbeit in Sachsen* (41), pp. 19-24, 1999.
- HORNFECK, C. Landschaftsplanungsrelevante Einsatzmöglichkeiten der Flugzeug- und Satellitenfernerkundung. *Landschaftsplanung.NET*. [http://www.lapla-net.de/texte/04\\_00/hornfeck/hornfeck.pdf](http://www.lapla-net.de/texte/04_00/hornfeck/hornfeck.pdf). Ausgabe 04/2000. ISSN 1439-9954.
- KENNEWEG, H.; LEHNERT, S.; MICHAEL, F.; SCHÖNFELD, R.; WERNER, C. MOMSIS: Biotop-Überwachung mit Satellitenfernerkundung, Endbericht. Arbeitsmaterialien zur Landschaftsplanung, Bd. 18, Technische Universität Berlin, Berlin, 2000.
- KNICKREHM, B.; ROMMEL, S. Biotoypenkartierung in der Landschaftsplanung. *Natur und Landschaft*, v. 70, n. 11, pp. 519-528, 1995.
- KRAUS, K. Fernerkundung. Bd. 2 Bonn, 1990.
- LEHMANN, F.; PISCHEL, R.; WEWEL E ProSmart-Endbericht (EB). Teilvorhaben HRSC-A (Befliegungskoordination & Prozessierung HRSC). Berlin, 1999.
- RAFFELSIEFER, M. <http://www.ub.uni-duisburg.de/diss/diss0024/kap4.pdf>. 2000.
- RÖSER, B. Grundlagen des Biotop- und Artenschutzes. Arten- und Biotopgefährdung, Gefährdungsursachen, Schutzstrategien, Rechtsinstrumente. Landsberg a. Lech, 1990.
- GÄHLER, M.; JANOWSKY, R.; SCHRÖDER, U. Automatisierte Biotoypenklassifizierung auf Basis höchstauflösender Flugzeugscannerdaten. In: BLASCHKE, T. (Ed.) *Fernerkundung und GIS: neue Sensoren – innovative Methoden*. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 233-240, 2002.
- WEWEL, F.; SCHOLTEN, F. Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mit dem Mehrzeilen-Stereoscanner HRSC-A. In: ALBERTZ, J. (Ed.) *Photogrammetrie und Fernerkundung – Neue Sensoren, neue Anwendungen*. Vorträge der 19. Wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der DGPF. Publikationen der DGPF, pp. 57-66, 2000.
- WIEGLEB, G.; BRÖRING, U.; MRZLJAK, J.; SCHULZ, F. (Ed.) *Naturschutz in Bergbaufolgelandschaften*. Landschaftsanalyse und Leitbildentwicklung, Heidelberg, 2000.

## Procedimentos Baseados em Segmentação para a Análise de Mudanças e Classificação Florestais com Dados de Satélite de Alta Resolução

Jürgen Janoth, Markus Eisi, Franz Klaushofer e Wilfried Luckel

### Resumo

O registro de modificações relevantes dentro da superfície florestada é de grande importância para diversas atividades de planejamento. Com esse objetivo foram analisados procedimentos baseados em segmentos da análise de mudanças bem como da classificação da floresta numa área-teste na região das montanhas Hohe Tauern (Alpes), usando dados multiespectrais de alta resolução Ikonos e dados dos satélites convencionais SPOT Pan e TM-Landsat, que estavam associados entre si por fusão de dados. Foram testados procedimentos de detecção de mudanças (*change detection*) que permitam um registro operacional de mudanças relevantes na área florestal. As funções são componentes integrantes de um protótipo de software que permite aos usuários na área de florestas, o processamento por conta própria de dados *raster* de satélites e a posterior amarração dos resultados em ambientes SIG já existentes. Além disso, foi pesquisado o conteúdo informativo de concepções de classificações baseadas em segmentos para acessar os parâmetros de estandes florestais. Os resultados de classificação baseados em segmentação, incluindo tanto os dados obtidos por fusão como os dados de alta resolução Ikonos apresentam distintas vantagens em relação aos procedimentos convencionais orientados a *píxel*. As pesquisas foram executadas no âmbito do projeto Enforma, financiado pela União Européia (Contrato N° ENV4-CT97-0423).

### 9.1 Introdução

O registro de mudanças, dentro de estandes florestais, constitui um setor de trabalho cada vez mais importante para as administrações governamentais e particulares de florestas. Os dados de satélite formam uma alternativa interessante pois, devido à sua capacidade de acessar grandes áreas, permitem otimizar os trabalhos de campo, respeitando recursos financeiros escassos. No âmbito do Projeto Enforma co-financiado pela União Européia, foi desenvolvido um protótipo de software em estreita colaboração com empresas de SR da Suécia (Satellus AB) e Finlândia (VTT Automation), da direção florestal regional de Salzburg (Áustria) e administrações florestais internacionais, que possibilita o processamento por conta própria de dados de satélite referentes à análise de mudanças e a introdução dos resultados, de forma simples, em SIGs já existentes. Ao lado das funções de display, o protótipo inclui funções essenciais da análise de modificações como o registro de superfícies que sofreram deslizamentos, destruição por ventos ou neve, a classificação da intensidade de mudanças, o registro de áreas de rebrota ou o registro de áreas com necessidade de desbastamento (poda). Em razão de exigências específicas dos

terrenos com intenso relevo, este software incluiu também o processamento de dados de alta resolução. Esse estudo apresenta os resultados que foram obtidos na área-teste Rauris (Hohe Tauern, Áustria) com a aplicação do protótipo Enforma. Para avançar além da detecção de uma mudança e definir melhor as modificações, o registro da situação inicial é de grande importância. Por isso foram testados também, além da análise de mudanças, procedimentos de classificação para dados de satélite de alta resolução e dados fundidos. Enquanto as possibilidades da interpretação e discriminação visual clássica de diferentes coberturas da superfície foram sensivelmente melhoradas em função da melhoria do reconhecimento de detalhes, os procedimentos convencionais automáticos baseados em *píxels* não podem ser aplicados de forma eficiente (Baatz e Schäpe, 2000; Hoffmann, 2000). Para poder, não obstante, avaliar esses dados adequadamente, as novas concepções estão direcionadas para os mais diversos métodos de fusão de dados (Baatz e Schäpe, 2000; De Kok et al., 2000), a utilização de "redes neurais" (Gopal e Woodcock, 1996) ou "procedimentos de classificação orientados a objetos" (Baatz e Schäpe, 2000; De Kok et al., 2000; Hoffmann, 2000). Os métodos de classificação orientados a objetos e os procedimentos de fusão de dados apresentam algumas vantagens, que são especialmente promissoras para os novos dados de alta resolução. A dificuldade maior na classificação automática de dados orbitais de alta resolução consiste no fato de que, devido à elevada resolução, coberturas da superfície da Terra podem constituir-se de um grande número de superfícies individuais espectralmente diferentes. Assim sendo, neste estudo foram aplicados procedimentos de fusão de dados bem como classificações baseadas em segmentação e orientadas a objetos que puderam usar a elevada resolução espacial para uma discriminação extremamente precisa de objetos. Outra vantagem desse procedimento consiste na opção de integrar no processo de interpretação, conjuntos de dados com as mais diferentes resoluções espaciais e utilizar de forma otimizada, as respectivas vantagens.

## 9.2 Pré-processamento de Dados

Para realizar as análises de modificações na área-teste Rauris, estavam disponíveis dados do TM-Landsat de 1992 e 1998, bem como dados atuais do Ikonos MSI de Setembro 2000, com uma resolução no solo de 4 m. Além disso, ortofotos aéreas digitais e dados de estandes florestais foram utilizados, bem como descrições de trabalhos de campo.

A execução das análises de modificações como também a combinação dos mais diferentes conjuntos de dados e a integração de fontes de informação adicionais, exigem um ajuste exato de imagem a imagem, bem como o cálculo da posição exata numa projeção cartográfica. Em acordo às condições topográficas existentes, efetuou-se uma ortorretificação. Para tanto, as coordenadas geográficas dos pontos de amarração foram obtidas de mapas topográficos em escala 1:50.000 e as distorções devidas ao relevo, especialmente as diferenças altimétricas maiores na imagem de satélite, foram corrigidas por meio do uso de informações altimétricas de um modelo digital de terreno.

No que se refere a pesquisas de seqüências temporais, que consideram também dados mais antigos de satélite, e devido à grande diferença de resolução espacial, resultou um questionamento específico a partir da comparação de dados do TM-Landsat com os dados de alta resolução do Ikonos. Por este motivo, os dados do Ikonos foram submetidos adicionalmente a uma segmentação de imagem, de modo que a análise de modificações foi executada tanto com dados não alterados como com dados segmentados e agregados.

Os dados Ikonos MSI também foram utilizados no âmbito da classificação. Além disso, foi testado um procedimento de fusão de dados para tarefas de classificação. Foram segmentados dados SPOT Pan e a topologia produzida foi transferida ao conjunto de dados do TM-Landsat com resolução mais pobre.

### 9.3 Metodologia

#### 9.3.1 Análise de modificações

As análises de modificações foram efetuadas com o protótipo Enforma. Trata-se aqui de uma aplicação independente (*Stand alone*) que se comunica com um SIG florestal existente, por meio de arquivos. Considerando que as funções essenciais de SIG já estão nos sistemas dos usuários, o protótipo Enforma concentra-se apenas na avaliação eficiente dos dados de satélite e na posterior conversão dos resultados num formato vetorial usual (*Shape*). O único pré-requisito para a execução da análise de modificações (correção topográfica, calibração, segmentação etc.) é um conjunto de dados de satélite multitemporal geocodificado que dispensa outros passos de pré-processamento (correção topográfica, calibração, segmentação etc.), que podem ser executados, caso necessário. A análise propriamente dita das modificações de superfícies que sofreram impactos (por ventos, neve, deslizamentos) baseia-se essencialmente num procedimento simples de diferenciação de imagens, especialmente das bandas espectrais do vermelho visível e IV médio. Antes de estabelecer a diferença ocorre um ajuste geométrico automaticamente (reamostragem) e espectral (união de histogramas) dos conjuntos de dados multiespectrais. Desvios menores na sobreposição exata dos dados multitemporais são nivelados por meio de um procedimento de diferenciação robusta (*Robust differencing*), no qual a formação da diferença não considera somente os *pixels* correspondentes de ambos os conjuntos de dados, mas também sua respectiva vizinhança. O registro das áreas modificadas ocorre por meio de uma seleção interativa de limites. As áreas assim selecionadas podem ser imediatamente exportadas como arquivo vetorial, generalizadas por meio de um filtro passa-baixa, ou serem classificadas no que se refere à intensidade das modificações.

As diferenças entre dados Ikonos de alta resolução e dados TM-Landsat ocorreram tanto com os dados originais Ikonos não alterados, como também com um conjunto de dados que anteriormente foi agregado por meio de uma segmentação de imagens.

#### 9.3.2 Classificação florestal

Para o registro da atual situação florestal, foram aplicados procedimentos orientados a segmentos, nos dados fundidos (TM-Landsat e SPOT Pan) bem como nos dados Ikonos de alta resolução. Contrastando com os procedimentos de classificação orientados em *pixels*, nos procedimentos baseados em segmentos e orientados a objetos são considerados não somente as características espectrais dos *pixels* individualmente, mas podem ser incluídas informações referentes aos objetos (alvos) no processo de classificação. A base para isso é uma segmentação da imagem, que permite uma subdivisão do conjunto de dados em sub-áreas, o mais homogêneas possível.

Vários estudos comprovaram que especialmente nos dados de satélites de alta resolução, parâmetros de textura apresentam um conteúdo de informação adicional elevado (Batz e

Schäpe, 2000; Janoth, 2000; Ryherd e Woodcock, 1996). Além disso, por meio da inclusão de um conjunto de regras baseadas em conhecimento pode-se entrar com informações específicas da classe e relacionadas ao contexto (Baatz e Schäpe, 2000; Janoth e Eisl, 1998).

Outra concepção para utilizar uma resolução espacial maior para fins de classificação é a opção de fusão de dados de satélite de diferentes resoluções geométricas. O objetivo é transferir a resolução espacial mais elevada (p. ex., dados pancromáticos) a um conjunto de dados com boa resolução espectral, para poder usar as vantagens de cada tipo de dado. Por isso, neste estudo foi analisado até que ponto é possível obter uma melhoria da precisão geométrica de classificação, por meio da transferência da topologia de segmentos, que foi calculada a partir de dados SPOT Pan de resolução superior e transferida para um conjunto de dados TM-Landsat de resolução inferior.

A idéia central da metodologia aplicada é o processamento de unidades de imagem, que se distinguem entre si por meio de feições características. Uma vantagem resulta imediatamente do fato de que as unidades de trabalho não são mais representadas por *pixels* individuais, porém por meio de segmentos maiores de imagem, mais ou menos homogêneos. Além disso, é possível calcular para estes segmentos de imagem uma série de outras características (como forma, textura ou contexto) que somente ocorrem a partir desse nível de agregação e que fornecem uma contribuição essencial para a posterior classificação. Assim, torna-se possível, também na classificação automática, tal como na interpretação visual, considerar características de forma e textura e relações espaciais que contribuem significativamente na melhoria da diferenciação de classes críticas, ou seja, que permitem efetuar a diferenciação. O cálculo dos segmentos de imagem é efetuado por meio de um procedimento de segmentação de imagem, que permite sua subdivisão em segmentos homogêneos. A inclusão das informações adicionais, que são calculadas para cada segmento, é efetuada por meio de um sistema especialista baseado em conhecimentos, no qual constam as regras que levam a uma discriminação ainda maior. Em detalhe, a concepção utilizada contém as seguintes componentes:

- Correção geométrica, ou seja, ortorretificação;
- Cálculo dos segmentos de imagem (segmentação de imagem);
- Classificação baseada em segmentos para diferenciação de classes espectrais;
- Estruturação de um conjunto de regras considerando-se outras informações;
- Classificação por meio de um sistema especialista (lógica *Fuzzy*).

O fluxograma (Fig. 9.1) ilustra a seqüência dos diversos processos de trabalho e as suas conexões.

## 9.4 Discussão

### 9.4.1 Análise de modificações

Estudos realizados na Suécia e Finlândia com base em dados do TM-Landsat e SPOT XI, demonstraram uma grande confiabilidade do método para registrar superfícies de florestas danificadas por efeitos de vento e avalanches de neve. Praticamente todas as superfícies danificadas puderam ser reconhecidas com segurança. Além disso, um grande número de medições no campo com DGPS (*Differential Global Positioning System*) favoreceram uma

precisão muito elevada das medições apoiadas por satélite (área média da superfície afetada foi de 2,99 ha com mais de 60 pontos afetados em medições com DGPS, e 2,96 no Enforma).

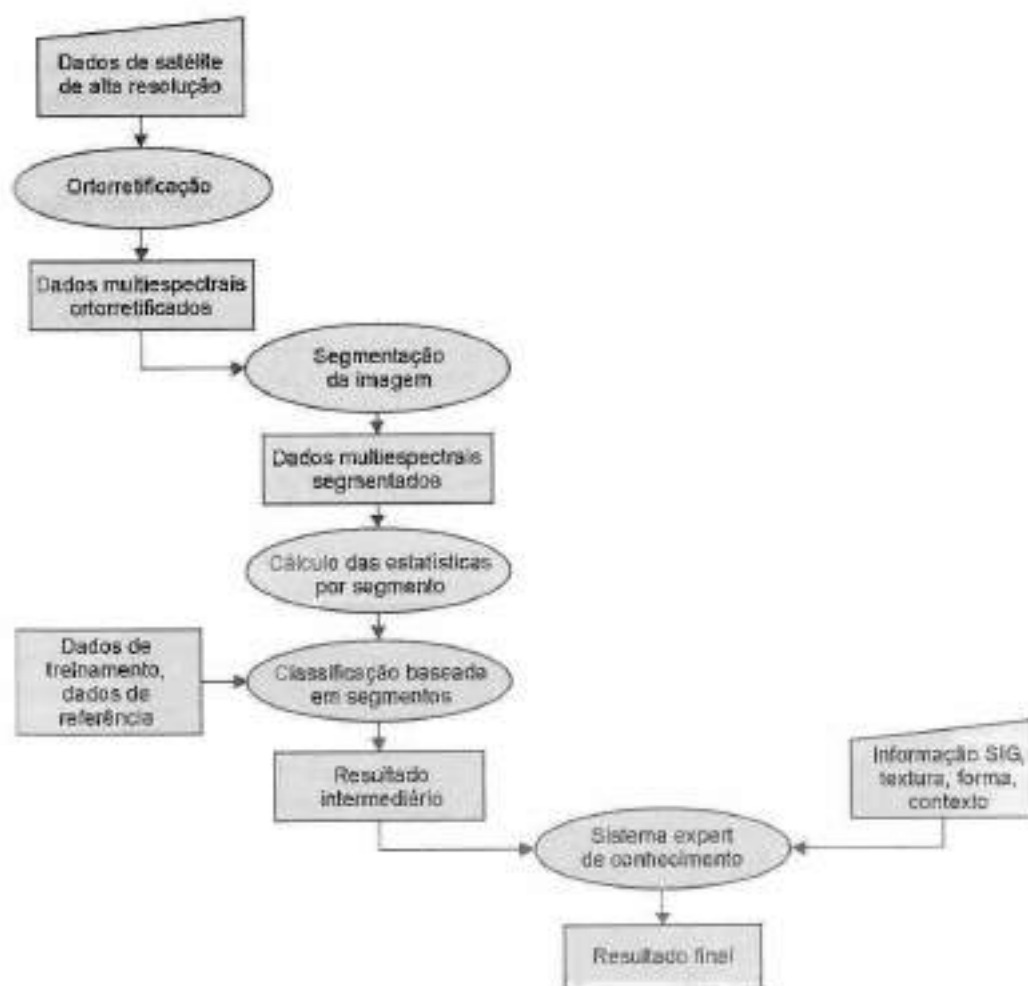


Fig. 9.1 Fluxograma da classificação de dados de alta resolução

Na área-teste Rauris, a comparação com dados TM-Landsat de 1992 e 1998, sob condições topográficas bem mais difíceis, mostrou resultados comparativamente bons. As superfícies que na análise de modificações indicavam um nítido recuo da floresta, puderam ser confirmadas no trabalho de campo. Por outro lado, não foram encontradas superfícies com danos de avalanches, vento e neve que já não houvessem sido detectadas anteriormente pela interpretação de imagens de satélite. Apesar da resolução relativamente grosseira dos dados TM-Landsat utilizados, foram identificadas superfícies degradadas com até 0,2 ha e num caso, encontrou-se até mesmo uma superfície com apenas uma árvore decepada. Enquanto a identificação e localização das superfícies que sofreram recuo da floresta forneceram resultados muito bons, a delimitação das



superfícies afetadas, devido à resolução do *pixel* relativamente grosseira, mostrou uma pequena superestimativa da área. Uma outra fonte de erros foi a identificação de caminhos florestais (estradas) como superfícies degradadas, que em parte é devida a erros no ajuste geométrico mas também está relacionada à sobreposição da floresta aos caminhos florestais.

Uma aplicação interessante da análise de modificações resulta da comparação de diferentes classes etárias, especialmente na comparação entre estandes florestais jovens e antigos. A classificação da intensidade de modificações mostrou-se aqui como adequada para indicar um aumento da vegetação dentro dos estandes jovens, permitindo assim um monitoramento do processo de rejuvenescimento. Em estandes de madeiras antigas, onde ocorre a retirada de árvores individuais, foi possível por meio deste método detectar um aumento da reflexão no IV médio.

Uma questão especial resultou da comparação de dados Ikonos MSI atuais de alta resolução com dados TM-Landsat. Ficou comprovado que o procedimento, mesmo com resolução espacial extremamente diferente, fornece um resultado útil. Sobras causadas pelas aberturas (falhas) nos estandes com menor densidade, reconhecidos no conjunto de dados Ikonos, podem ser "limpos" em sua maior parte por meio de uma função de generalização. Um resultado ainda melhor foi obtido com um conjunto de dados Ikonos no qual, por meio de uma segmentação prévia de imagem, foi alcançada uma agregação dos *pixels* a unidades maiores de imagem (vide Fig. 9.2).



Fig. 9.2 Registro de superfícies danificadas por vento e avalanches a partir de dados Ikonos MSI

Em virtude da boa precisão geométrica dos conjuntos de imagem utilizados, é possível detectar até mesmo estreitas bordas de árvores, ao longo dos limites de estandes.

Uma segmentação de imagens executada antes da análise de modificações mostrou-se por isso muito adequada para a comparação de conjuntos de dados de imagem com as mais diferentes resoluções espaciais. Além disso, esta concepção de trabalho também é indicada para a comparação de dois conjuntos de dados de alta resolução e diminuir, pelo menos em parte, as elevadas exigências à exatidão geométrica entre duas passagens.

#### 9.4.2 Classificação de florestas

Na classificação da situação florestal atual foram utilizados dois procedimentos conjugados baseados em segmentos. O objetivo principal dos dados TM-Landsat gerados por fusão de dados foi a melhoria da resolução geométrica dos resultados de classificação por meio da utilização dos limites de segmentos obtidos em dados pancromáticos do SPOT. Os resultados mostram que é obtida uma nítida melhoria da resolução espacial da classificação dos dados casados, considerando apenas suas características espectrais (vide Fig. 9.3). A melhoria da resolução espacial obtida pela transferência de segmentos, torna-se perceptível, especialmente nos limites dos estandes e na delimitação de caminhos florestais. A pesquisa mostrou, além disso, que o tamanho dos segmentos formados é de importância especial para a precisão da classificação. De modo geral, pode-se dizer que os segmentos demasiadamente grandes selecionados atuam negativamente no resultado da classificação, e que segmentos pequenos demais podem ser agregados no processo de classificação. Erros na ordenação espectral podem ser corrigidos por meio da inclusão de informações texturais de um sistema especialista com base em conhecimentos.

O método utilizado demonstrou que é adequado para melhorar claramente a resolução espacial dos resultados da classificação e que ele apresenta, através da concepção baseada em segmentos, um grande potencial para a inclusão de outras características de forma ou contexto. É

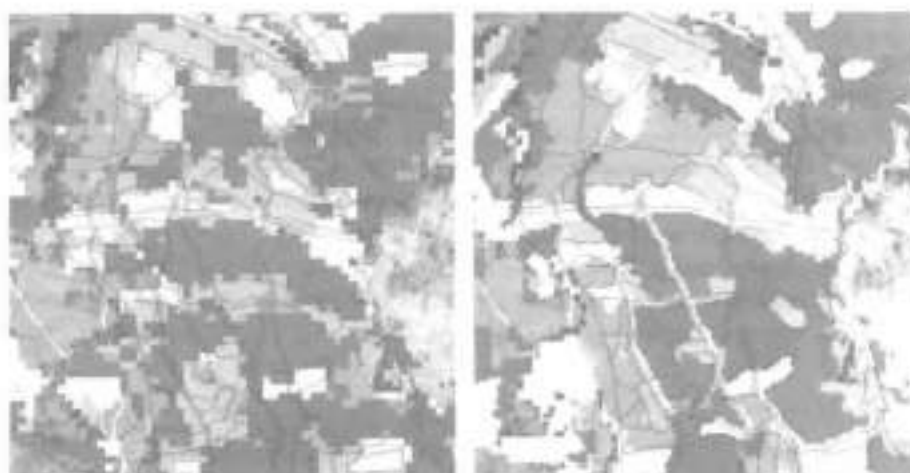


Fig. 9.3 Melhoria da resolução geométrica no resultado da classificação: TM-Landsat (esquerda), fusão de dados TM-Landsat e SPOT Pan (direita)

óbvio que para tanto haverá exigências especiais ao ajuste geométrico dos conjuntos de dados utilizados. Considerando que grandes modificações na área florestal, que tenham ocorrido entre duas tomadas de imagem, poderiam gerar erros na transferência da topologia de segmentos, as duas datas de obtenção das imagens fundidas devem estar o mais próximo possível uma da outra.

Finalizando, foi testado um procedimento de classificação, baseado em segmentos, com os dados Ikonos MSI de alta resolução. Os primeiros resultados confirmam as vantagens de concepções baseadas em segmentos em relação aos métodos convencionais de classificação orientados a *pixels*, para dados de satélite de alta resolução. Os resultados mostram ainda que não somente o tamanho do segmento, mas também o método de formação do segmento (critérios de homogeneidade e de forma utilizados, método de fusão etc.) desempenham um papel fundamental. Com relação a isso, o algoritmo de segmentação ainda requer melhorias. Não obstante, também aqui é possível mostrar o efeito positivo de redução da heterogeneidade de dados. Além disso, a concepção voltada a segmentos também neste caso possibilita a integração de outras características de textura, forma e contexto relacionadas aos segmentos, por meio de um sistema especialista baseado em conhecimento. Uma detalhada análise de assinaturas das áreas de treinamento também usadas mostra que, apesar da excelente resolução espacial dos dados Ikonos MSI, a separação espectral de diferentes estandes é limitada pela falta de informação espectral na faixa do IV médio.

## 9.5 Perspectivas

Procedimentos baseados em segmentos para a detecção de modificações relevantes em florestas bem como para a classificação florestal foram aplicados na área de estudos Rauris. Ao lado de dados multiespectrais convencionais SPOT Pan e TM-Landsat, que estavam conectados pela fusão de dados, foram usados neste estudo dados multiespectrais Ikonos de alta resolução. Foram testados procedimentos de detecção de mudanças, que permitem o registro operacional de modificações relevantes nas florestas. Além disso, foi analisado o conteúdo informativo de concepções de classificação, baseadas em segmentos, para o registro de parâmetros de estandes. Os resultados de classificações fundadas em segmentos, tanto dos dados fundidos como dos dados Ikonos de alta resolução, apresentam nítidas vantagens sobre os procedimentos convencionais orientados a *pixels*. As vantagens referem-se à redução da heterogeneidade e da variabilidade dos dados, à possibilidade de combinar dados de diferentes resoluções entre si e à opção de integrar características de segmentos no processo de classificação. Nesse contexto, este estudo somente esgotou uma parte do possível potencial de classificação, considerando as características texturais. Dentro dessa concepção, o procedimento de segmentação de imagens e a base de conhecimento possuem um papel fundamental. Os estudos posteriores serão, portanto, direcionados a uma melhoria da segmentação e à análise de outras características de segmentos que poderiam ser empregadas na classificação.

## 9.6 Referências Bibliográficas

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

- BENIE, G. B.; THOMSON, K. P. B. Hierarchical image segmentation using local and adaptive similarity rules. *International Journal of Remote Sensing*, 13, pp. 1559-1570, 1992.
- BOLSTAD, P. V.; LILLESAND, T. M. Rule-based classification models: flexible integration of satellite imagery and thematic spatial data. *Photogram. Engin. & Remote Sensing*, v. 58, n. 7, pp. 965-971, 1992.
- De KOK, R.; BUCK, A.; SCHNEIDER, T.; AMMER, U.; BAATZ, M. Data fusion with Landsat 7 imagery. In: STROBL; BLASCHKE; GRIESEBNER. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg 2000*, Herbert Wichmann Verlag, pp. 90-97, 2000.
- GOPAL, S.; WOODCOCK, C. Remote sensing of forest change using artificial neural networks. *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, v. 34, n. 2, pp. 398-404, 1996.
- HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. SMC-3 (6), pp. 610-621, 1973.
- HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 12, pp. 100-132, 1985.
- HOFFMANN, A.; SMITH, G. M.; LEHMANN, F. Die Klassifizierung Hochauflösender Daten – ein Per-Parcel-Ansatz mit Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A. In: STROBL; BLASCHKE; GRIESEBNER. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg 2000*, Herbert Wichmann Verlag, pp. 228-237, 2000.
- JANOTH, J. *Technical report on very high resolution data. Role and methodology*. ENFORMA Technical Report, GSP00/D001-ENFORMA, 2000.
- JANOTH, J.; EISL, M. Umweltmonitoring im Alpenen Raum mit hochauflösenden Satellitendaten. In: *VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, Heft 3, 1998, pp. 166-171, 1998.
- LOBO, A.; MOLONEY, K.; CHIARIELLO, N. Fine-scale mapping of Grassland from digitized photography: an approach using image segmentation and discriminant analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 1, pp. 65-84, 1998.
- RYHERD, S.; WOODCOCK, C. Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. *Photogram. Engin. and Remote Sensing*, 62, pp. 181-194, 1996.
- SALI, E.; WOLFSON, H. Texture classification in aerial photographs and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 13, pp. 3395-3408, 1992.

## Análise de Dados do Satélite Ikonos Baseada em Segmentação - Utilização do Software de Análise de Dados eCognition para Diferentes Áreas-Testes

Marco Neubert e Gotthard Meinel

### 10.1 Introdução

Em vista dos dados de novos sistemas sensores, cada vez mais estão disponíveis dados de maior valor e resolução para diferentes aplicações. O desenvolvimento de métodos de interpretação inovadores, necessários para trabalhar com esses dados, ainda não está em sintonia com essa tendência. Não obstante, as novas concepções de classificação de dados estão em vias de substituir a interpretação de imagens baseada em *pixels*, que ainda predomina.

Este capítulo descreve a aplicação da concepção de classificação baseada em segmentação, com dados do satélite Ikonos, sendo que a atualmente mais discutida, na área de sensoriamento remoto, é o pacote eCognition da empresa *Definiens Imaging GmbH* de Munique (Alemanha). Os resultados descritos referem-se à aplicação da versão 1.0 deste pacote, sendo também considerada a versão 3.0. Foram estudadas duas áreas-teste diferentes: um espaço urbano e outro, predominantemente rural. Além disso, o software foi aplicado a uma cena total do Ikonos, para se obter experiência com o processamento de grandes quantidades de dados. Os resultados da pesquisa são apresentados a seguir. Além disso, são apresentados os potenciais de utilização bem como os problemas dos dados e da concepção usada.

### 10.2 Exigência de Novas Concepções de Interpretação

Os novos dados de sensoriamento remoto com altíssima resolução conformam problemas devidos ao volume de dados a serem trabalhados bem como ao seu nível de detalhe. Se por um lado o problema de *pixels* mistos desses dados é pequeno, por outro, aumentou fortemente a variabilidade e o ruído dentro de classes quase homogêneas (vide Schiewe, Tufte e Ehlers, 2001). As concepções convencionais de classificação de imagem baseadas em *pixels* estão próximas dos seus limites. Aumenta a necessidade de novos métodos de classificação, já que o desenvolvimento dos sensores está voltado para uma resolução geométrica cada vez melhor.

Para satisfazer aos novos desafios com a interpretação de imagens desses sensores, são necessárias concepções inovadoras orientadas não somente para níveis de cinza, pois a forma dos objetos e as relações de vizinhança são características igualmente importantes para a classificação de determinados usos. Uma solução para esse problema pode ser fornecida por novos métodos de interpretação, como, por exemplo, a segmentação de imagens, redes neurais ou conjuntos *Fuzzy* (vide Blaschke et al., 2000). Diferentes concepções de segmentação já

são conhecidas no processamento de imagens, biometria e medicina. Para aplicações na área de sensoriamento remoto, o software eCognition é no momento a concepção comercial mais promissora.

### 10.3 Análise de Imagens Baseada em Segmentação com eCognition

Aqui não pretendemos descrever exhaustivamente a ferramenta de análise de imagens eCognition para a classificação de dados de SR baseada em segmentos, já que isto se encontra em outras publicações (p. ex., Meinel, Neubert e Reder, 2001b; Definiens Imaging, 2003). Além disso, este software encontra-se numa fase intensa de desenvolvimento, sendo emitida no outono de 2002, uma terceira versão melhorada. O objetivo da empresa Definiens foi fazer através do eCognition uma ponte entre SR, ou seja, entre análise de imagens, e sistemas de informações geográficas (SIG).

O primeiro passo do trabalho com o eCognition é a segmentação de dados de imagem em áreas homogêneas. Para tanto podem ser estabelecidos vários planos de segmentação, utilizando-se dados de diferentes resoluções e de diferentes origens (p. ex., dados de SIG adicionais). A rede hierárquica de elementos de imagem assim constituída corresponde melhor à realidade do conteúdo da imagem em diferentes planos de observação, ou seja, em diferentes escalas. De modo geral, no entanto, a segmentação corresponde a um processo que não pode ser repetido pelo usuário, que precisa ser efetuado pelo experimento usando o princípio de tentativa e erro, para se alcançar resultados otimizados.

A classificação a seguir teve como base conhecimentos, considerando funções de pertinência (*membership function*) da lógica *fuzzy* ou usando superfícies de exemplos (classificador de vizinho mais próximo). A base é um conjunto de regras semânticas a serem desenvolvidas, que contém as condições da classificação. Para tanto, são muito úteis como características de classes, as relações de vizinhança, as relações com sub e superobjetos e as características de segmentos (p. ex., índices de formas) além das informações de níveis de cinza como características de classes. Assim, torna-se possível uma maior diferenciação de classes e uma classificação mais completa.

### 10.4 Descrição da Área de Estudos

Aplicou-se o sistema eCognition em duas áreas-teste, nas quais estavam disponíveis imagens do Ikonos (Fig. 10.1). Para apresentar um exemplo de aplicação em área urbana e suburbana, foi escolhido um setor de 2,4 x 2,4 km de uma paisagem da área urbana e suburbana da cidade de Dresden de 04.06.2000 (Fig. 10.2). Esta área apresenta um relevo praticamente plano que é caracterizado por uma utilização do solo bastante heterogênea. No setor norte predomina o uso industrial ou comercial. Ao sul do rio Elbe, além de áreas agrícolas, há bairros residenciais com construções de casas individuais ou em blocos de prédios, áreas industriais e comerciais, áreas pertencentes à ferrovia, jardins, parques e praças de esporte, cemitérios, pomares, florestas bem como extensas faixas gramadas e áreas verdes.

Para caracterizar uma área rural, escolheu-se uma região próxima, conhecida como *Vordere Sächsische Schweiz* (Saxônia Suíça, Fig. 10.4). Essa área de estudo, com 3,5 por 3,5 km de extensão, faz parte de uma cena do Ikonos de 01.08.2000. A região possui um relevo

pronunciado bem como um uso do solo adaptado à natureza e mais homogêneo. Caracteriza-se por uma alternância de florestas e áreas abertas, planícies e relevos residuais tipo *Tafelberg*, áreas com afloramentos de rochas, bem como o vale do rio Elbe. Uma parte da região corresponde ao Parque Nacional *Sächsische Schweiz* (Saxônia Suíça).



**Fig. 10.1** Localização das áreas de pesquisa no Estado de Sachsen (Saxônia): Dresden e "Saxônia Suíça"



**Fig. 10.2** Área-teste Dresden-Oeste, imagem Ikonos de 04.06.2000 (©Space Imaging Europe SA)

## 10.5 Bases de Dados e Pré-processamento de Dados

Os dados Ikonos utilizados já foram descritos em vários artigos (dentre outros em Meinel e Reder, 2001) e os parâmetros do sistema encontram-se na página de Internet do fornecedor (European Spaceimaging, 2003).

A qualidade dos dados de imagem é muito boa, quando não houver influência atmosférica alguma. No entanto, é possível que ocorram problemas de nuvens e/ou sombras de nuvens, obrigando o usuário a aceitar até 20% de cobertura. Pelo fato do sensor ser giratório, a taxa de repetição de imageamento foi reduzida a três dias, porém isto ocasiona problemas de visada inclinada (inclinação de prédios) e uma diminuição da resolução. Além disso, em virtude do preço relativamente elevado, a competitividade em preço com relação a sistemas aerotransportados – que geralmente apresentam resoluções melhores –, é fortemente reduzida. Aguarda-se a evolução do preço e da qualidade de produtos similares de futuros fornecedores como Orbimage, DigitalGlobe ou ImageSat (Neubert, 2001), especialmente após o aumento de mensagens sobre problemas de disponibilidade dos dados do Ikonos.

Os dados fornecidos com correção de órbita, apresentam imprecisões de posicionamento relativamente grandes (erro médio de posicionamento da cena de Dresden: 180 m, 108 m na direção  $x$  e 144 m na direção  $y$ ). Em função disso, um aumento otimizado do valor agregado dos dados somente é possível por meio de uma ortorectificação. Ela é necessária além disso, para poder usar geodados adicionais para a segmentação ou classificação. Para a região de Dresden (tamanho da cena total: 11 x 11 km), foi feita uma correção com pontos de amarração na base de um mosaico de ortofotos (largura do *raster* 1 m, desvio de posição  $\leq 0,5$  m), sendo que foram aplicados os *Erdas Imagine Georectification Tools* e utilizados 31 pontos de controle GCP, obtendo-se uma precisão média (erro RMS) de 5,5 m. O setor Dresden-Oeste foi corrigido com 37 GCPs a uma precisão média de 0,5 m.

A cena total da região *Vordere Sächsische Schweiz* foi ortorectificada por aproximação com o pacote de software *Geomatica Orthoengine* da *PCI Geomatics* (Toulin, 2001). A base foi um mosaico de ortofotos aéreas (largura de *raster* 0,4 m) e um modelo digital de terreno (1 m largura de *raster*). Com isto obteve-se um erro RMS médio de 2,4 m.

Testes anteriores demonstraram que a segmentação baseada numa imagem de fusão (casamento de resolução, método dos principais componentes) fornece os melhores resultados para ambas as regiões. Por isso, os dados Ikonos disponíveis foram fundidos, combinando o conteúdo de detalhe dos dados pancromáticos de 1 m de resolução com aqueles multiespectrais de 4 m de resolução. A resolução para todos os canais foi calculada para 1 m, já que eCognition 1.0 exige um tamanho de *raster* unitário de 1 m. Foram utilizados respectivamente os quatro canais multiespectrais e um índice de vegetação (NDVI).

Como dados adicionais à segmentação, foi usado na área urbana um conjunto de dados em bloco rasterizado para a geração das ruas. Na área rural estava disponível um modelo digital de terreno obtido com scanner a laser (*TopScan*) de alta resolução, calculada a 1 m (resolução original de aproximadamente 3 m, vide Csaplovics e Wagenknecht, 1999).

## 10.6 Resultados do Processamento

### 10.6.1 A área urbana

A segmentação dos dados de entrada foi efetuada em três planos. Todos os planos foram parte da classificação posterior, sendo que os dois planos de segmentos mais grosseiros foram



utilizados exclusivamente como funções de pertinência e o resultado foi melhorado no plano mais refinado por meio de superfícies com exemplos.

Os resultados do processamento da área de estudos urbana são visualizados na Fig. 10.3. O resultado da classificação mostra uma imagem homogênea (sem o efeito "sal e pimenta"). Puderam ser estabelecidas no total 13 classes, duas a mais, na mesma área, que no procedimento de classificação baseado em *pixels* (vide Meinel, Neubert e Reder, 2001b, com a comparação total). Apesar da forte heterogeneidade de uso e do elevado grau de detalhe dos dados, obteve-se uma qualidade da classificação total de 89,6% (vide Tab. 10.1), tendo sido gerados 20 pontos-teste aleatórios para cada classe. O uso da camada (*layer*) de ruas, permitiu a geração de ruas e melhorou a segmentação. Áreas maiores, mais homogêneas, foram de classificação mais fácil e precisa do que objetos pequenos heterogêneos. As dificuldades ocorreram especialmente quando da classificação, ou seja, discriminação de áreas de indústrias e comerciais, áreas sem uso, estacionamento de veículos e outras áreas impermeabilizadas. As possibilidades de classificação de novas estradas/ruas (que não se encontravam na camada de estradas), corpos hídricos lineares, praças de esporte e uma parte muito pequena de superfícies não classificadas (0,07%), mostraram, por outro lado, resultados positivos. Uma classificação de diferentes usos do solo foi possível em parte (p. ex. praças de esporte), ultrapassando a determinação usual de cobertura do solo e alcançando assim um plano de informação mais detalhado.

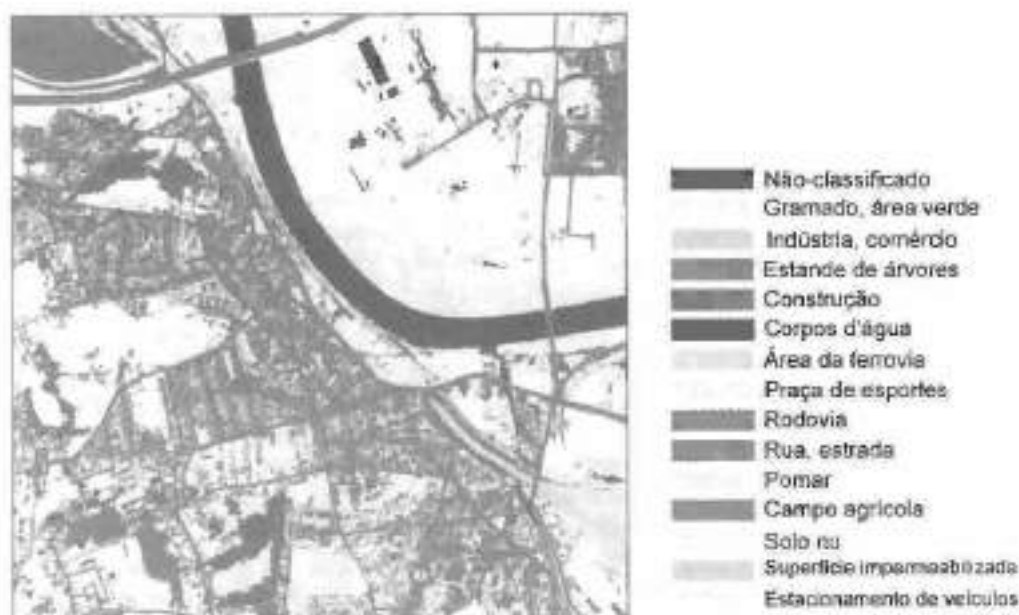


Fig. 10.3 Resultado da classificação por meio de eCognition na área de pesquisa urbana

### 10.6.2 Área de pesquisa rural

A segmentação dessa área de pesquisa também foi efetuada em 3 planos, sendo que a segmentação mais fina não serviu para a classificação. A alocação de classes foi realizada por meio de funções de pertinência, e somente nos casos de influência atmosférica ocorreu uma alocação manual a classes.



Fig. 10.4 Área-teste "Saxônia Sulça anterior", imagem Ikonos de 01.08.2000

Tab. 10.1 Qualidade de reconhecimento (QR) e qualidade de classificação (QC) na área urbana

CLASSE	QR (%)	QC (%)
Campo agrícola	100,0	100,0
Gramado	80,9	85,0
Praça de esporte	100,0	95,0
Floresta	100,0	95,0
Pomar	100,0	95,0
Jardins (1)	—	—
Corpos d'água	100,0	100,0
Indústria, comércio	62,5	75,0
Construção	94,7	90,0
Área da ferrovia	100,0	100,0
Rodovia	100,0	100,0
Rua, estrada (2)	—	—
Solo nu	83,3	75,0
Área impermeabilizada	69,6	80,0
Estacionamento	83,3	75,0
Qualidade total da classificação	89,6	

(1) A classe jardins foi subdividida na classificação com eCognition, no plano mais refinado de segmentação, em seus componentes de cobertura do solo.

(2) Superfícies de estradas foram eliminadas da determinação da qualidade de reconhecimento, visto que não foram classificadas, porém derivadas de uma camada (layer) de estradas.

O resultado do processamento representado na Fig. 10.5, apresenta freqüentemente limites fractais, que dificultaram a classificação, pois nesse caso não chegaram a ser utilizados dados adicionais para melhorar a segmentação. A cobertura de nuvens e a névoa foram desfavoráveis e não permitiram uma diferenciação entre floresta de folhosas e coníferas. Uma correção atmosférica anterior não foi possível devido à falta de um software. A utilização de um modelo digital de terreno melhorou o resultado e permitiu, entre outros, a classificação de afloramentos rochosos, ou seja, a eliminação de determinados usos (p. ex., ferrovia somente no vale). Além disso, seria possível aplicar adicionalmente um modelo digital de superfície para a classificação de prédios e similares (vide Hoffmann e Van der Vegt, 2001; Hofman, 2001). O resultado da classificação permitiu a caracterização de doze classes de cobertura do solo, com uma qualidade total de classificação de 92,9% (Tab. 10.2). Uma boa discriminação das diferentes culturas agrícolas foi possível, tendo sido problemática a diferenciação de Construções em relação à classe Solo nu, bem como entre Ruas e Caminhos.

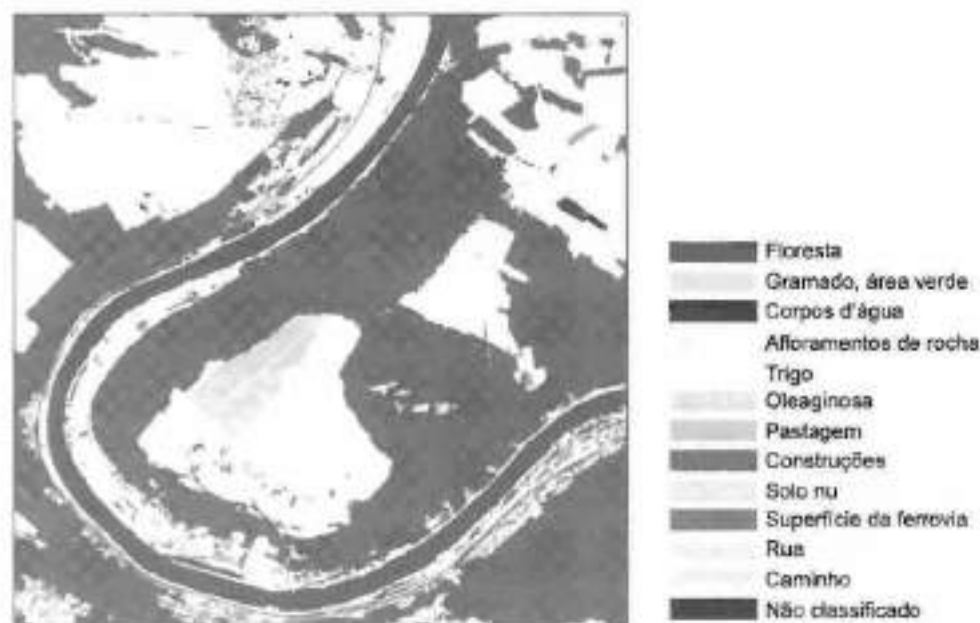


Fig. 10.5 Resultado da classificação por meio de eCognition na área rural

### 10.7 Aplicação a uma Cena Ikonos Completa - Área Urbana de Dresden

Além das áreas-teste de tamanho médio já descritas, procurou-se verificar sua aplicabilidade a uma região extensa. Para tanto, selecionou-se a cena total Ikonos da área urbana de Dresden. A região tem um tamanho de 11 x 11 km e apresenta uma estrutura de uso muito heterogênea.

Rapidamente verificou-se, no entanto, que o processamento de uma área desse tamanho, com o respectivo volume de dados de entrada (1,6 GB), ultrapassou a capacidade do software em sua primeira versão, apesar do excelente hardware. A consequência foram enormes tempos de cálculo, uma geração de grandes volumes de dados temporários e, em parte, devido a isso,

**Tab. 10.2** Qualidade de reconhecimento (QR) e qualidade de classificação (QC) na área rural

CLASSE	QC (%)	QR (%)
Floresta	100,0	87,0
Área verde	90,0	90,0
Pastagem	100,0	100,0
Trigo	100,0	100,0
Oleaginosas	100,0	100,0
Corpos d'água	100,0	100,0
Construção	95,0	86,4
Solo nu	80,0	94,1
Área da ferrovia	100,0	100,0
Rua	95,0	70,4
Caminho	60,0	100,0
Afloramentos de rocha	95,0	100,0
Qualidade total da classificação		92,9

ocorreram quedas do sistema. A navegação na imagem exigia muito tempo e os tempos de cálculo tornaram a aplicação do software mencionado impraticável. Além disso, não foi possível estabelecer a menor unidade de segmentação (somente com fator de escala 16 ao invés de 10), o que resultou desfavorável à transferência da classificação para toda a área, devido à segmentação desigual em comparação com a área-reste. O conjunto de regras de classificação é, em princípio, facilmente transferível, não obstante ser necessário um ajuste custoso dos valores de níveis de cinza, com base em diferentes valores espectrais.

### 10.8 Potencial do Uso de Dados do Ikonos e da Concepção do eCognition

Os dados Ikonos são utilizáveis, em princípio, até as escalas a 1:5.000, penetrando assim em setores que até agora estavam como que "reservados" à fotografia aérea. Não obstante, com uma resolução no solo de um metro, esses dados são inferiores aos modernos scanners aerotransportados que trabalham na faixa decimétrica. Na sua forma ortoretificada, os dados podem ser bem utilizados como conjunto de dados SIG, para a sobreposição com outros geodados. Também é possível a conexão com opções de informações baseadas em Internet, como mostra o Sistema de Informações Urbano Klagenfurt (Petrini-Monteferrri et al., 2001). Usado em conjunto com um modelo digital de superfície, são possíveis, ainda, boas modelagens em 3D.

Por meio do sistema eCognition abre-se grande potencial para mapeamentos automáticos de uso do solo – um dos principais objetivos do sensoriamento remoto. Baseadas nisso, diferentes tarefas de monitoramento podem ser realizadas, tais como o mapeamento de biótopos, paisagens, florestas e áreas de proteção ambiental. Também estão disponíveis concepções de mapeamento da impermeabilização (Pilz e Strobl, neste volume). Esses dados, bem como a concepção do eCognition, são de grande importância na atualização de diferentes conjuntos de dados digitais (Neubert e Meinel, 2002).

## 10.9 Considerações Finais

Com este estudo foi possível demonstrar que eCognition fornece uma metodologia adequada para a análise de dados de satélite com alta resolução. Tanto para áreas urbanas como para áreas rurais obteve-se uma qualidade de classificação de aproximadamente 90%, ou seja, um resultado bastante satisfatório. A versão 1.0, utilizada neste trabalho, apresentou ainda algumas insuficiências, que dificultaram sobremaneira o trabalho (vide Meinel, Neubert e Reder, 2001a e 2001b; Schiewe, Tuft e Ehlers, 2001). Já existe uma terceira versão ampliada e otimizada desse pacote de software, e muitos dos problemas mencionados já foram resolvidos. Paralelamente, este software continua em intenso desenvolvimento. A partir da *homepage* do fabricante na Internet, pode ser obtido um grande número de informações sobre suas melhorias e inovações (Definiens Imaging, 2003). Um aspecto freqüentemente citado, no entanto, permanece: o processo de segmentação continua sendo não transparente e não é possível executar um teste da qualidade dos segmentos.

O desenvolvimento de modernos métodos de interpretação é um processo atual em andamento, que futuramente aumentará em dinâmica e variedade os primeiros dados e métodos disponíveis no mercado. Como ocorre freqüentemente no desenvolvimento de novas tecnologias, ainda levará algum tempo para o seu amadurecimento. O software eCognition ainda apresenta limitações no que se refere ao seu uso operacional. Apesar das dificuldades iniciais mencionadas, sua concepção de classificação orientada a objeto pode ser ampliada e otimizada para o uso na interpretação de dados de sensoriamento remoto de alta resolução.

Do lado do usuário há exigências extremamente elevadas para trabalhar questões complexas com os novos métodos. Fica a expectativa de que o desenvolvimento seja amigável ao usuário e transparente, para diferentes aplicações operacionais do sensoriamento remoto.

## 10.10 Agradecimentos

Este trabalho de pesquisa contou com o apoio da *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (Fundação de Pesquisas da Alemanha), no âmbito do Projeto "Possibilidades de utilização dos mais recentes dados de satélite de alta resolução, para o planejamento territorial" (Me 1592/1-2).

Agradecemos ao Sr. Thierry Toutin do *Canada Centre for Remote Sensing* (CCRS), Ottawa, pela ortorectificação da cena do Ikonos da região *Vordere Sächsische Schweiz*.

## 10.11 Referências Bibliográficas

- BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP, E.; STROBL, J.; ZEIL, P. Object-oriented image Processing in an Integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. In: CREMERS, A.; GREVE, K. (Ed.) *Environmental Information for Planning, Politics and the Public*, Metropolis, Marburg, v. 2, 2000.
- CSAPLOVICS, E.; WAGENKNECHT, S. Airborne Laser Scanning zur topographischen Modellierung von Felsgebieten. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI*, Wichmann, pp. 108-119, Heidelberg, 1999.
- DEFINIENS IMAGING. eCognition website: <http://www.definiens-imaging.com>. 2003
- EUROPEAN SPACE IMAGING. Ikonos Geo – <http://www.euspacimaging.com/content/Products/GEO/index.asp>. 2003.

- HOFFMANN, A.; van der VEGT, J. *New sensor systems and new classification methods: laser and digital camera-data meet object-oriented strategies*. GIS 6, pp. 18-23, 2001.
- HOFMANN, P. *Detecting buildings and roads from Ikonos data using additional elevation information*. GIS 6, pp. 28-33, 2001.
- MEINEL, G.; NEUBERT, M.; REDER, J. The potential use of very high resolution satellite data for urban areas – first experiences with Ikonos data, their classification and application in urban planning and environmental monitoring. In: *Proceedings of 2nd Symposium on Remote Sensing of Urban Areas*, Regensburg – Regensburger Geographische Schriften, Heft 37. CD-ROM, full paper, pp. 67-68, 2001a.
- \_\_\_\_\_. *Pixelorientierte versus Segmentorientierter Klassifikation von Ikonos-Satellitenbilddaten – ein Methodenvergleich*. PFG 3/2001, pp. 157-170, 2001b.
- MEINEL, G.; REDER, J. *Ikonos-Satellitenbilddaten – ein erster Erfahrungsbericht*. KN 1/2001, pp. 40-46, 2001.
- NEUBERT, M.; MEINEL, G. Fortführung von Geobasisdaten durch die segmentbasierte Auswertung von Ikonos-Daten- erste Ergebnisse. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.) *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung, XIV. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg*, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 403-408, 2002.
- NEUBERT, M. Segment-based analysis of high resolution satellite and laser scanning data. In: HILTY, L. M.; GILGEN, P. W. (Ed.) *Sustainability in the Information Society. Proceedings of the 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection*, Zürich, Marburg: Metropolis, pp. 379-386, 10-12.10.2001.
- PETRINI-MONTEFERRI, F.; STEINNOCHER, K.; HOFFMANN, C.; ENGELHARDT, K.; KOREN, G. Ikonos-Satellitendaten für Stadtinformationssysteme – Fallbeispiel Klagenfurt. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIII*. Wichmann, pp. 356-361, Heidelberg, 2001.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. *Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing*. GIS 6, pp. 28-33, 2001.
- SCHNEIDER, T.; de KOK, R.; BUCK, A.; MANAKOS, I. Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmenwechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten? In: Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (Ed.): *Aktuelle Forschungsberichte*. TUM, Freising, pp. 234-258, 2000.
- TOUTIN, T. *Geometric Processing of Ikonos Imager with DEM*. Joint ISPRS – Workshop on High Resolution Mapping from Space, Hannover, 2001.

## **Modelos Altimétricos ERS-TanDEM de Resolução Média e Dados de Alta Resolução Digitais em Estereoscopia da Câmara HRSC e sua Aplicação Comercial**

Lutz Reichel, Wolfgang Noack, Walter Knöpfle e Frank Lehmann

### **Resumo**

A HRSC (*High Resolution Stereo Camera*), a primeira câmara digital estereoscópica de uso operacional do mundo, em aplicações orbitais ou a bordo de aeronaves, é uma grande inovação. A tecnologia HRSC ultrapassa de longe a precisão geométrica e radiométrica das câmaras de fotografias aéreas convencionais baseadas em filmes. O processamento é totalmente digital e completamente automatizado, de modo que grandes volumes de dados podem ser processados em pouco tempo, resultando em produtos de alta qualidade. Para o planejamento das redes de comunicação da crescente indústria de telecomunicações, são imprescindíveis dados altamente precisos e atuais sobre a altimetria do relevo e sobre as superfícies do terreno. Os modelos digitais de superfície (DEM), que estão na base de todos os produtos processados, desempenham aqui um importante papel. Os dados em 3D, preparados com um sistema de visualização, representam uma melhoria essencial no planejamento de microcélulas das cidades. Complementando os DEMs que podem ser obtidos em todo o mundo pela Missão ERS Tandem com resolução média, podem ser determinadas as localizações ideais para torres de transmissão em áreas densamente povoadas.

### **11.1 O Modelo Altimétrico Digital ERS-Tandem com Resolução Média**

#### **11.1.1 Modelos digitais altimétricos**

Um modelo digital altimétrico (MDA) é uma representação digital da superfície do terreno, legível em computador. Um MDA pode reproduzir uma grade ou uma matriz de imagem, na qual a cada elemento de imagem está associado uma determinada altimetria topográfica. Normalmente estas altimetrias são representadas numa escala de preto (altitudes baixas) a branco (altitudes elevadas) em níveis de cinza. Para melhorar a visualização de um relevo topográfico, freqüentemente lhe são associados efeitos de sombras, artificialmente.

#### **11.1.2 Elaboração de modelos digitais altimétricos interferométricos a partir de dados de radar**

A isl-AG é uma empresa que surgiu a partir da Agência Espacial Alemã (DLR) em Oberpfaffenhofen (Bavária) e utiliza para a elaboração de modelos digitais altimétricos, os dados

brutos dos satélites de radar europeus ERS-1 e ERS-2 da Agência Espacial Européia (ESA), que foram adquiridos durante a assim denominada "Missão Tandem". Os dois satélites voaram defasados em 24 horas, em órbitas ligeiramente deslocadas uma da outra, tendo um deslocamento espacial (*Baseline*) geralmente de 80 a 300 metros. Este método de imageamento é denominado de "Interferometria de passagem repetitiva" (*Repeat Pass Interferometry*) (Fig. 11.2).

Devido ao seu comprimento de onda, a radiação de radar penetra nas nuvens, que dificultam, especialmente nas latitudes tropicais, a observação da Terra com sistemas ópticos. A utilização de sistemas de radar abre perspectivas totalmente inovadoras para a obtenção de modelos digitais altimétricos. Assim, é possível registrar a superfície terrestre, de dia ou de noite e com cobertura de nuvens. A técnica da Interferometria de radar permite, por exemplo, produzir uma imagem tridimensional da superfície terrestre. O sistema de radar orbital envia sinais "ativos" em comprimentos de onda na faixa decimétrica a centimétrica (bandas L e X). Os satélites ERS usam a banda C com um comprimento de onda de 5,6 cm. O sensor registra o tempo do percurso e a intensidade do eco refletido. A partir deste sinal de retorno, pode-se calcular posteriormente, no solo, a fase de radar. Considerando que com apenas uma imagem de radar, a posição tridimensional de um ponto no solo não pode ser determinada inequivocamente, são combinadas duas imagens de diferentes posições. Na medida em que forem conhecidas a posição absoluta da antena, a posição relativa das duas antenas entre si bem como a diferença do caminho percorrido por ambas as imagens, é possível determinar a posição de um ponto no solo. Esta diferença é determinada com precisão de alguns milímetros pela avaliação da diferença de fase. O chamado "Interferograma" (Fig. 11.1) contém as diferenças de fase para cada ponto da imagem. A diferença de fase então é recalculada para valores altimétricos precisos.

Mudanças que ocorrem no intervalo de tempo do imageamento, devidas ao vento ou às condições atmosféricas (nuvens), ou precipitação, prejudicam a coerência de ambas as imagens e com isto a qualidade dos MDAs. No mapa de coerência, para cada ponto é registrada a

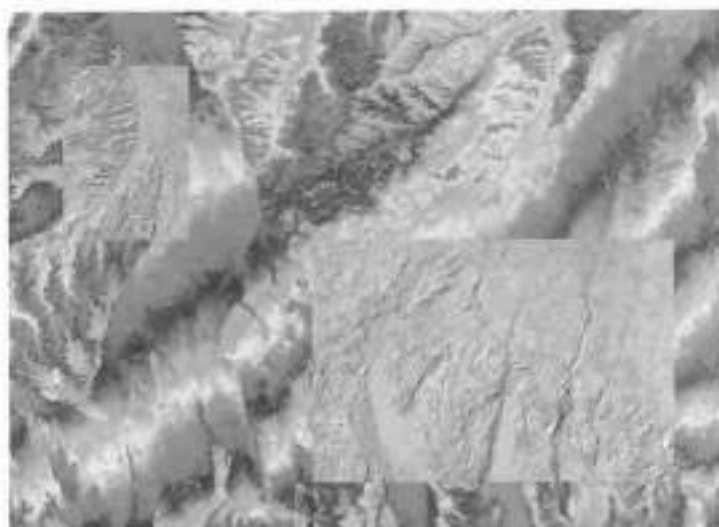
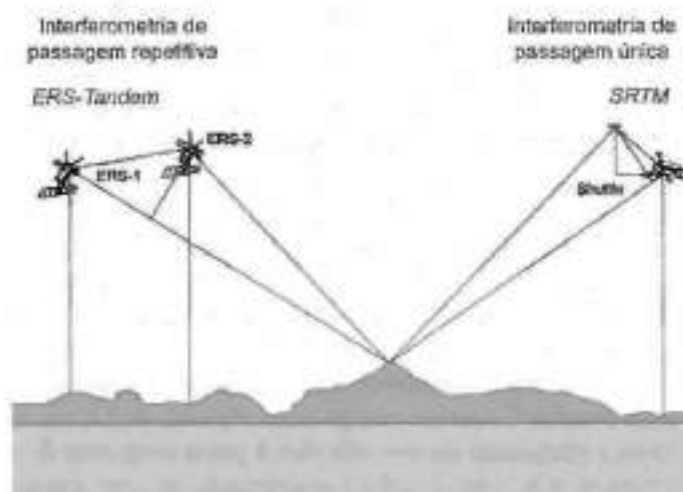


Fig. 11.1 Interferograma





**Fig. 11.2** Princípio do imageamento: comparação da operação ERS tandem com a Missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

similaridade das duas imagens em nível de cinza. Em superfícies incoerentes, derivar a altimetria do terreno não é mais possível. Os passos para a obtenção do interferograma incluem o ajuste exato das duas imagens entre si, bem como filtragens para a melhoria da imagem. Cada valor de cor representa aqui um valor de fase entre 0 e  $2\pi$ , sendo a escala de cores repetida ciclicamente, formando as "bordas" (*fringes*). As diferenças de fase posteriormente são recalculadas para valores altimétricos, levando em consideração a geometria do satélite. Finalizando, os valores altimétricos são transformados em uma projeção cartográfica (UTM) ou em coordenadas geográficas. Por meio do processamento de um interferograma, no caso do ERS, é coberta uma superfície de 100 x 100 km. Para poder elaborar MDAs que cubram grandes áreas, foi desenvolvido no DFD/DLR (Agência Espacial da Alemanha), um procedimento de compor mosaicos dos conjuntos de dados individuais. Os MDAs, após a sua confecção, estão disponíveis num sistema de referência geográfico ou geodésico unitário. Esses conjuntos de dados resultantes ficam localizados inequivocamente e a posição relativa entre eles é definida, podendo ser ajuntados um ao outro sem bordas e com uma pequena sobreposição. Para tanto, nas regiões onde houver sobreposição é utilizada a média aritmética ponderada dos respectivos valores altimétricos. Adicionalmente, discrimina-se aqui uma ponderação local e global dos valores altimétricos. A ponderação global considera a constelação geométrica dos sensores no instante do imageamento, e a medida de confiança local usada para cada valor altimétrico unitário é a coerência. Além da justaposição das cenas vizinhas de uma faixa, ou seja, de faixas vizinhas, no caso de haver incoerência, são sobrepostas cenas do mesmo setor imageado. No mosaico resultante, os erros de altimetria e posicionamento são minimizados por meio de ponderação.

## 11.2 O Modelo Digital Altimétrico da Europa Central

No DFD foi elaborada uma seqüência de processamento para produzir modelos digitais altimétricos a partir de dados de interferometria, já executados operacionalmente na

empresa Ix1-AG. Podem ser processados do mundo inteiro, tanto os dados de passagens repetitivas (*Repeat-Pass Data*) como, p. ex., da missão ERS-1/2 Tandem, bem como dados de passagens simples (*Single-Pass Data*) como p. ex., a missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission, 2000*). O grande mosaico com dados altimétricos aqui apresentado (Fig. 11.3), foi produzido para a demonstração das capacidades operacionais do sistema, sendo comercializado exclusivamente pela Ix1-AG.

A partir de 444 pares de Tandem, a superfície imageada total foi processada para modelos altimétricos reunidos numa área com mais de 1 milhão de km<sup>2</sup>. Em paralelo ao mosaico com os dados altimétricos, foi elaborado um mapa com os erros da altimetria, no qual podem ser lidos diretamente os erros de altimetria em qualquer posição.



Fig. 11.3 MDA Europa Central

### 11.2.1 Exemplos de imagens

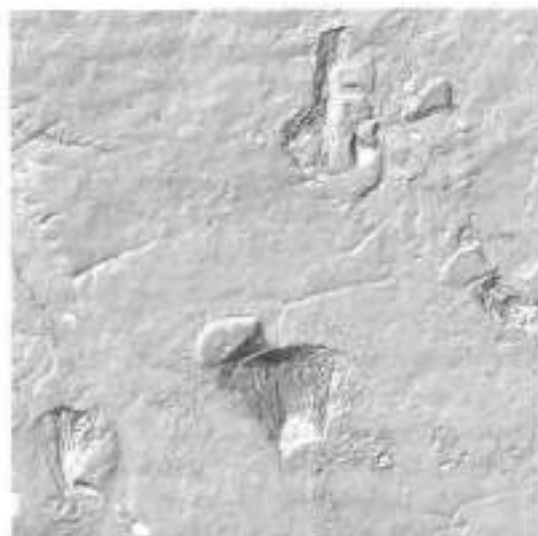


Fig. 11.4 Exploração de lignita a céu aberto Garzweiler (Alemanha)

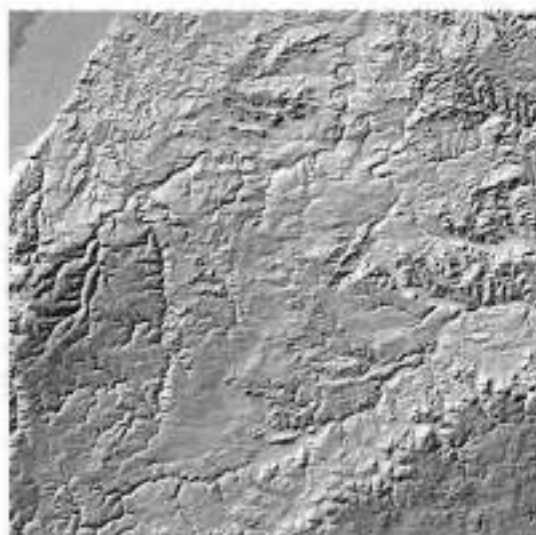


Fig. 11.5 Cidade de Stuttgart e setor norte da Floresta Negra (Alemanha)

### 11.2.2 Precisão dos dados

A posição horizontal foi calculada espacialmente por meio da pesquisa dos deslocamentos horizontais de diferentes direções de imageamento (órbitas ascendentes e descendentes).

Para validar as altimetrias de 70 mil pontos de navegação distribuídos pela Alemanha (dados da Agência Cartográfica Militar), foram calculadas as diferenças altimétricas e os erros (RMS). Além disso, foi feita uma comparação areolar com o modelo altimétrico DTED nível 1, no qual foram obtidas as diferenças altimétricas ponto a ponto de todo o mosaico.

Com a bicorrelação, em áreas florestadas de regiões com relevos pronunciados, especialmente em vales profundamente recortados, resultaram outros erros altimétricos. Para eliminá-los, foram desenvolvidos novos algoritmos e filtros para o processamento, visando a obter, também em regiões montanhosas, uma precisão satisfatória. Em fins de junho de 2001, os trabalhos foram concluídos.

A precisão altimétrica (1 Sigma) resultante foi de:

- 2 a 5 m – para áreas planas
- 5 a 10 m – para relevo moderado
- 8 a 15 m – para áreas montanhosas
- > 25 m – para relevos alpinos

A resolução horizontal obtida foi de 25 m e a resolução vertical de 1 m. O novo modelo altimétrico possui também, em relação a procedimentos anteriores, vantagens decisivas: é homogêneo sobre vários países (usando-se um único sensor) e consistente (todos os pontos da Terra foram registrados de modo unitário e processados), está disponível em forma digital para posterior utilização em computador, sendo o conjunto de dados mais atual disponível da Alemanha.

### 11.2.3 Aplicações

**Sensoriamento remoto:** os modelos altimétricos são adequados para completar, ampliar e otimizar os dados de SR óptico e radar.

**Telefonia móvel:** para analisar os locais mais indicados de posicionamento de antenas para retransmissão de qualquer tipo de difusão de ondas de telecomunicação são necessários MDAs atuais. Os MDAs obtidos com a ajuda dos dados SAR da missão ERS-Tandem possuem a vantagem adicional, de acessar a situação real de uma região, ou seja, as construções e a cobertura florestal, que constituem obstáculos para as ondas de telecomunicações.

**Sector de águas:** para a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas são necessários MDAs altamente precisos e homogêneos, sem distinção de quaisquer limites políticos.

**Previsão de catástrofes e avaliação de riscos:** o gerenciamento bem sucedido de eventos catastróficos freqüentemente fracassa devido a dados básicos errôneos ou inexatos. Para a avaliação de um eventual risco (p. ex., empresas seguradoras) ou para o uso de pessoal e material auxiliar (p. ex., encontrar os locais ideais para o lançamento com pára-quadras de bens para socorro), são necessários dados atualizados.

**Planejamento da infra-estrutura do tráfego:** no planejamento de rodovias e ferrovias, os MDAs podem simplificar o cálculo de volumes de terra a serem movimentados e de pontes e obras de arte a serem construídas.

## 11.3 Dados Digitais em Estereoscopia de Alta Resolução do Scanner HRSC

A DLR em Berlim-Adlershof e a empresa Ixi-AG iniciaram em conjunto, em maio de 2001, uma grande campanha de imageamento aéreo das áreas com maior adensamento populacional da Alemanha. Por meio deste imageamento foram adquiridos, num curto espaço de tempo, dados digitais de alta resolução que, ao contrário das fotografias aéreas convencionais, podem ser imediatamente trabalhados virtualmente. E isso vale para muitas das mais diversas aplicações.

### 11.3.1 O sistema câmara HRSC

A câmara digital multiespectral HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) é um sistema de SR óptico operacional que pode fornecer tanto ortofotos pancromáticas e multiespectrais altamente precisas, bem como MDAs digitais de altíssima precisão.

A "Câmara de alta resolução estereoscópica aerotransportada" (HRSC-A) foi concebida e desenvolvida pela DLR para a missão russa Mars 96 (Marte 96) e posteriormente modificada para aplicações de SR aerotransportado. Em razão de um contínuo desenvolvimento, atualmente estão disponíveis 3 câmaras: HRSC-A, HRSC-AX (telecâmara) e HRSC-AXW (câmara grande angular).

A resolução geométrica dos dados varia de 10 a 40 cm, dependendo da altitude do voo. Ela pode ser utilizada tanto para aplicações fotogramétricas como para aplicações gerais de sensoriamento remoto. A Tab. 11.1 dá uma visão de conjunto sobre a resolução geométrica, a precisão absoluta da planimetria (em cm) e a precisão absoluta da altimetria segundo a altitude de voo. Com a HRSC dispõe-se, pela primeira vez, de um sistema sensor operacional, que

fornece, de modo concomitante, orto-imagens pancromáticas e multiespectrais de altíssima precisão, como também MDAs digitais de grande precisão (Hoffmann e Lehmann, 2000).

Tab. 11.1 Características do sistema HRSC

ALTITUDE DO VÔO	RESOLUÇÃO GEOMÉTRICA (cm)	PRECISÃO ABSOLUTA DA PLANIMETRIA (cm)	PRECISÃO ABSOLUTA DA ALTIMETRIA (cm)
1.500 m	8 / 17*	10 - 15	15 - 20
3.000 m	12 / 17*	15	20
5.000 m	20 / 20*	15 - 20	20 - 25

\* Velocidade no solo de 280 km/h, frequência de varredura 450 Hz no HRSC-A

O sistema opto-eletrônico HRSC possui uma série de vantagens em relação a sistemas de câmaras convencionais, baseadas em filmes:

- Acesso rápido aos dados digitais com elevada resolução radiométrica;
- Canais estereoscópicos (pancromáticos);
- Quatro canais multiespectrais (azul, verde, vermelho, IV próximo);
- Uma escala, sem perspectiva central;
- O modelo altimétrico é gerado automaticamente em paralelo;
- Mosaicos simples e automáticos da cena;
- Precisão horizontal e vertical muito elevadas;
- Possibilidade de trabalho digital dos dados, orientado para o cliente.

O HRSC trabalha segundo o princípio de *Pushbroom*: nove linhas de CCDs estão montadas paralelamente ao plano focal do instrumento e atrás de uma óptica. Através do movimento para frente do avião são tomadas simultaneamente nove faixas de imagens que se sobrepõem. Das nove linhas de CCDs, cinco estão montadas em diferentes ângulos de visada ( $\pm 20,5^\circ$ ,  $\pm 12^\circ$ ,  $0^\circ$ , pancromático) e quatro das nove linhas de CCDs estão equipadas com diferentes filtros para produzir imagens multiespectrais (vermelho, verde, azul e infravermelho).

Para amortecer os movimentos de alta frequência da posição do voo e garantir uma permanente visada de Nadir, a câmara foi montada sobre uma plataforma de estabilização. Os parâmetros de navegação do voo são registrados por meio de um sistema de navegação Applanix POS/DG com GPS e INS (Sistema de Navegação Inercial).

A originalidade da HRSC consiste, além da tecnologia de tomada de dados e sua combinação com sistemas GPS/INS de altíssima precisão, no processamento de dados totalmente automático. Esse procedimento de processamento fotogramétrico foi desenvolvido pelo *Institut für Planetenerkundung* (Instituto de Pesquisa de Planetas, Prof. Albertz) e pela *Technische Universität Berlin* (Universidade Técnica Berlin). O processamento inclui o cálculo de modelos digitais de superfície (MDS) a partir de dados estereoscópicos com várias linhas, o cálculo de orto-imagens projetadas em mapas e a formação de mosaicos de dados multiespectrais (Hoffmann e Lehmann, 2000).

### Ficha técnica dos diferentes sistemas HRSC

HRSC	- A	- AX	- AXW
Sistema	Optoeletrónico digital; princípio de <i>pushbroom</i>		
Bandas	5 bandas estereoscópicas/fotométricas 4 bandas multiespectrais de azul até infravermelho próximo		
Resolução	8 a 40 cm em altitudes de voo de 2.000 a 10.000 m.		
Precisão	15 a 20 cm nos planos horizontal e vertical, a uma altitude de 2.500 m		
Distância focal	175 mm	151 mm	47 mm
Campo de visada	38° x 12°	41° x 29°	30° x 79°
N de linhas de CCD	9 (4 cores)	9 (4 cores)	5 (2 cores)
Pixel por linha	5272	12172	12172
Tamanho do <i>pixel</i>	7 m	6,5 m	6,5 m
Resolução radiométrica	8 bit	12 bit	12 bit
Frequência de varredura máxima	450 linhas/s	1640 linhas/s	1640 linhas/s
Estabilização	Plataforma ZEISS T-AS		
Gravação de dados	Gravador de dados SONY de alta velocidade		
Georreferenciamento	Sistema de navegação ApplAnix POS/DG com GPS e INS		

### 11.3.2 Comparação com fotografias aéreas

A HRSC fornece, automaticamente, orto-imagens verdadeiras, ao contrário das orto-imagens clássicas, que precisam ser geradas de fotos aéreas após um custoso processo. Geralmente é utilizado um modelo digital de altimetria do terreno para a geração de orto-imagens a partir de fotografias aéreas, que serve como base. A perspectiva central de uma fotografia aérea, por meio deste modelo do terreno é transferida para a projeção ortogonal de um mapa topográfico. Aqui deve ser considerada, no entanto, uma limitação importante: esses dados valem somente para a altimetria do terreno; objetos que sobressaem do terreno não são corrigidos. Isto significa que construções, árvores e demais elementos de cidades e da paisagem acima do terreno, permanecem não corrigidos, bem como o deslocamento radial dos objetos. As características geométricas desses objetos são determinadas quase que aleatoriamente por seu posicionamento na fotografia aérea, dependendo de se encontrarem no setor central (pouca distorção) ou nas bordas (grandes deslocamentos).

Em contraste, as orto-imagens dos dados do HRSC são obtidas com ajuda de um modelo digital da superfície. O resultado do processamento são orto-imagens, que representam a superfície terrestre com uma precisão de 15 cm nos eixos *x* e *y*. Distorções resultantes de inclinações do terreno ou diferenças altimétricas são eliminadas pelo uso de um modelo da superfície do terreno, e casas e superfícies do terreno são representadas com a geometria correta. Origina-se a assim denominada verdadeira orto-imagem (*True Orthoimage*).

**As fotografias aéreas possuem diferentes escalas** numa foto. As inclinações das tomadas e a superfície do terreno resultam numa escala de imagem das fotografias aéreas não unitária, razão porque a escala é fornecida somente com valores numéricos arredondados. Nos dados da câmara HRSC, a escala das faixas de imagem processadas é unitária.

A reunião em **mosaicos de fotografias aéreas é difícil**, visto que fotografias vizinhas apresentam diferentes geometrias. Os deslocamentos radiais já descritos, dificultam juntar diferentes fotografias aéreas, visto que objetos em imagens vizinhas são representados de forma diferente por apresentarem geometrias distintas (deslocamento para diferentes lados). Isto dificulta a confecção de um mosaico a partir de diferentes fotografias, e as áreas de transição são de difícil justaposição. Nos dados digitais HRSC isso ocorre automaticamente durante o processamento.

As **classificações espectrais** não são possíveis em fotografias aéreas devido ao fato de diferentes níveis de cinza serem comuns aos mesmos objetos. Isto torna difícil a aplicação de procedimentos de classificação automática, visto que se baseiam no princípio de que os mesmos objetos apresentam as mesmas características espectrais. Outra limitação resulta da pequena resolução radiométrica de fotografias aéreas. Dados de câmaras digitais em comparação com dados de fotografias aéreas apresentam uma resolução radiométrica nitidamente superior (1.000 níveis de cinza (10 bit) em relação a 60 níveis de cinza (6 bit) em fotografias aéreas) e por isso são claramente superiores para interpretações espectrais e mosaicos, bem como para análises em setores sombreados (Hoffmann e Lehmann, 2000).

### 11.3.3 Exemplos de imagens do HRSC



Fig. 11.6 Orto-imagem digital do centro de Munique (Alemanha)



Fig. 11.7 *Orto-ímagem pancromática e modelo digital de superfície*

#### 11.4 Aplicações

**Telecomunicações:** para o planejamento do rápido crescimento de redes de telecomunicações, são indispensáveis dados extremamente precisos e atuais sobre a altimetria do terreno bem como sobre as superfícies do terreno (*relevo*). Com ferramentas de software inteligente podem ser produzidos modelos tridimensionais de cidades, rapidamente, sendo que eles servem para a modelagem da extensão da radiação. Assim podem ser calculadas as posições otimizadas para a localização de antenas de transmissão.

**Cartografia:** a atualização de mapas topográficos, planos de cidades e mapas cadastrais; visualizações.

##### Planejamento urbano e regional

**Prevenção de catástrofes e seu monitoramento:** para a avaliação de riscos de empresas seguradoras e resseguradoras.

**Agricultura e florestas:** detecção de estandes e cálculo de volumes, controle de subvenções.

**Planejamento de mineração e deposição final de rejeitos de mineração:** modelos digitais de altimetria servem para a análise volumétrica.

##### Monitoramento ambiental

**Tráfego:** procedimentos para obtenção de informações para a construção de vias, atualização de sistemas de navegação de automóveis, planejamento de obras civis (lineares, traçados diversos, oleodutos etc.).



## 11.5 Considerações Finais

A descrição dos produtos topográficos de alta resolução e digitais obtidos de dados do ERS-Tandem, bem como dos dados HRSC de altíssima resolução mostrou que é possível obter dados altimétricos de diferentes escalas e assim fornecer ao cliente e usuário um amplo espectro de opções de aplicações. Os conjuntos de dados são complementares no que se refere à sua sinergia e constituem uma inovação na área de dados altimétricos.

## 11.6 Referências Bibliográficas

- BUCHER, T.; LEHMANN, F. Fusion of HyMap hyperspectral with HRSC-A multispectral and DEM data for geoscientific and environmental applications. In: *Proceedings of IEEE IGARSS – International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Honolulu, Hawaii, 24-28.7.2000.
- CAMPBELL, J. *Introduction to remote sensing*. London, 1996.
- HESE, S.; LEHMANN, F. Comparison of digital surface models of HRSC-A and Laser scanner for forest stand characteristics. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 33, 2000.
- HILDEBRANDT, G. *Fernerkundung und Luftbildmessung*. Heidelberg, Wichmann, 1996.
- HOFFMANN, A.; SMITH, G.; HESE, S.; LEHMANN, F. *Die Klassifizierung hochauflösender Daten: ein per-parcel Ansatz mit Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A*. DGPF Jahrestagungsband 1999, Essen, 1999.
- HOFFMANN, A.; LEHMANN, F. *Vom Mars zur Erde – die erste digitale Orthobildkarte Berlin mit Daten der Kamera HRSC-A*. Kartographische Nachrichten, 50 2/2000, 2000.
- KERNER, G. *Die Luftbildkarten des Bayerischen Vermessungsamts*. KN 2/97, pp. 59-65, 1997.
- LEHMANN, F.; BUCHER, T.; HESE, S.; HOFFMANN, A.; MAYER, S.; OSCHÜTZ, E.; ZHANG, Y. Data fusion of HYMAP hyperspectral with HRSC-A multispectral stereo and DTM data, remote sensing data validation and application in different disciplines. In: *Proceedings of 1<sup>st</sup> EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, RS Laboratories, University of Zürich, Switzerland, 6-8.10.1998.
- LEHMANN, F.; BUCHER, T.; HESE, S.; HOFFMANN, A.; MAYER, S.; OSCHÜTZ, E.; ZHANG, Y. Kombination von hyperspektralen HyMap-Daten und HRSC-A multispektral- und DGM-Daten zur Validierung und Nutzung in Verschiedenen Anwendungsgebieten, DGPF Jahrestagung, 1998, München, 1998.
- LVA Sachsen Orthobilder und Luftbildkarten, Faltblatt mit Produktinformation, Leipzig, 1998.
- MAYER, S. Retrieving object borders and height from high-resolution digital surface models. In: *Proceedings of 4<sup>th</sup> World Multiconference on Systems, Cybernetics and Informatics*, Orlando, USA, 23-26.07.2000.
- SABINS, F. *Remote sensing, principles and interpretation*. New York, 1997.
- SMITH, M.; HOFFMANN, A. Parcel-based approaches to the classification of fine spatial resolution imagery: example methodologies using HRSC-A data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 33, 2000.

## Ajuste Automático de Parâmetros de Segmentação

Raul Q. Feitosa, Gilson A. O. P. Costa, Thiago B. Cazes, Bruno Feijó

### Resumo

O passo mais importante na classificação de imagens baseada em objetos é a segmentação da imagem em objetos significativos, sendo crítica para o desempenho da classificação a definição de valores adequados para os parâmetros de segmentação. O ajuste destes valores é, em geral, realizado por um procedimento lento e subjetivo, de tentativa e erro. Este trabalho propõe um método automático de ajuste dos parâmetros de segmentação, baseado em Algoritmos Genéticos (AG). Apresentamos uma função objetivo intuitiva e computacionalmente simples, que avalia a qualidade da segmentação a partir de uma referência provida pelo usuário. O método explora o espaço de possíveis soluções, procurando um conjunto de parâmetros que minimize o resultado dessa função. Um protótipo, incluindo a implementação de um algoritmo de segmentação amplamente difundido, foi desenvolvido para avaliar o desempenho do método proposto. Em vários experimentos, usando imagens de diversas características, o método convergiu para uma solução próxima da ideal.

**Palavras-chave:** Segmentação, otimização, algoritmos genéticos, ajuste de parâmetros, classificação baseada em objetos.

### 12.1 Introdução

A tecnologia de sensoriamento remoto teve um extraordinário avanço nos últimos anos. Em particular, a partir do advento dos sensores orbitais de alta resolução espacial disponíveis comercialmente, o volume de dados sobre a superfície da Terra aumentou de forma substancial. As imagens de alta resolução expuseram as limitações das técnicas tradicionais de classificação *pixel-a-pixel* (Blaschke, 2001). Este cenário fez crescer a demanda por métodos automáticos de interpretação de imagens. Um dos avanços recentes mais importantes da pesquisa neste campo é o procedimento de classificação baseado em objetos (Blaschke, 2001), que procura explorar a informação semântica associada a segmentos homogêneos da imagem.

O passo mais importante do método de classificação baseado em objetos é a segmentação da imagem em objetos significativos. De fato, neste procedimento, a exatidão da classificação depende essencialmente da qualidade da segmentação. Os principais fatores que determinam a qualidade da segmentação são o algoritmo de segmentação utilizado e os valores de seus parâmetros. O primeiro fator foi objeto de vários trabalhos que compararam diferentes segmentadores (por ex., Zhang, 1996; Zhang, 1997; Kartikeyan et al., 1998; Meinel e Neubert, 2004). O segundo aspecto diz respeito ao ajuste dos valores dos parâmetros do algoritmo de

segmentação. Em geral, é tarefa do analista procurar o conjunto de valores ideais para esses parâmetros. A dificuldade deste trabalho reside no fato de que a relação entre os valores dos parâmetros e o correspondente resultado da segmentação geralmente não é evidente. Por isso, na prática, o analista normalmente ajusta os parâmetros de segmentação mediante uma longa e tediosa série de tentativas e erros, até obter um resultado que seja visualmente satisfatório.

De fato, a maioria dos algoritmos de processamento de imagem requer algum tipo de ajuste para operar satisfatoriamente. Essa necessidade motivou várias propostas de métodos automáticos ou semi-automáticos para o ajuste de parâmetros, que vão desde ferramentas gráficas de apoio (por ex., Schneider, 1997), passando por sistemas interativos (Matsuyama, 1993), até soluções quase totalmente automáticas (Crevier, 1997).

O ajuste automático de parâmetros da segmentação envolve duas questões principais: a primeira é a seleção de uma função (que denominamos *função objetivo*) que expresse adequadamente a qualidade da segmentação; a segunda é o método de otimização dos parâmetros, que consiste em procurar os valores que minimizem a função objetivo escolhida.

Diversos métodos foram propostos para medir a qualidade da segmentação. Podem ser subdivididos em métodos supervisionados e não-supervisionados. Nos métodos supervisionados, o índice de qualidade reflete o grau de similaridade entre o resultado produzido pelo procedimento de segmentação e uma referência (Zhang, 1996), ou seja, um "padrão ouro", em geral produzido manualmente por um fotointérprete. Toda a subjetividade inerente à avaliação da qualidade deve ser representada, neste caso, pela segmentação de referência. Os métodos não-supervisionados, ao contrário, não requerem uma referência e não consideram a subjetividade do analista ou particularidades da aplicação (por ex., Espindola, 2006).

A segunda questão importante relativa ao ajuste de parâmetros diz respeito à otimização propriamente dita. Muitas vezes, a função objetivo escolhida não apresenta as propriedades exigidas pelos métodos de otimização baseados no cálculo. Nestes casos, métodos estocásticos, como Algoritmos Genéticos (AG) (Davis, 1990; Bhanu, 1991; Bhanu, 1994; Kueblbeck, 1997) são a alternativa mais usual, uma vez que não impõem qualquer restrição sobre a função objetivo a ser otimizada. Os AGs têm, contudo, um elevado custo computacional associado.

Este trabalho aborda cada um desses tópicos e propõe um método supervisionado para o ajuste de parâmetros de segmentação, no qual se utilizam uma função objetivo particular, que avalia numericamente a similaridade entre pares de segmentos, e um AG na etapa de otimização.

Foi construído um protótipo em software para avaliar experimentalmente o desempenho do método proposto. Embora o método possa ser aplicado em diversos algoritmos de segmentação, os experimentos se limitaram ao algoritmo descrito por Baatz (2000), utilizado no software eCognition (Definiens, 2005).

O texto subsequente está organizado da seguinte forma: inicialmente apresentamos uma introdução sucinta sobre algoritmos genéticos. Descrevemos então detalhadamente o método de ajuste proposto. Em seguida, é descrito o algoritmo de segmentação utilizado em nossos experimentos. A seção seguinte apresenta a avaliação experimental e discute os resultados obtidos. O trabalho termina apresentando as principais conclusões e apontando direções para trabalhos futuros.

## 12.2 Algoritmos Genéticos

### 12.2.1 Conceitos básicos e terminologia

Algoritmos Genéticos (AG) representam uma técnica computacional para a busca de soluções para problemas complexos de otimização, de difícil formulação matemática ou com espaços de busca muito grandes. A técnica é inspirada na Teoria da Evolução das Espécies proposta por Charles Darwin (Darwin, 1859), baseando-se nos princípios de sobrevivência dos mais aptos e da reprodução. Segundo a teoria de Darwin, características individuais são transmitidas de pais para filhos, e os indivíduos mais bem adaptados ao ambiente têm maior chance de sobreviver e, por consequência, de passar as suas características a um número maior de descendentes.

Os AGs realizam um processo adaptativo e paralelo de busca de soluções análogo ao processo de evolução natural. É adaptativo porque novas soluções são criadas a partir de soluções anteriores, e paralelo porque várias soluções são consideradas num dado momento.

Na terminologia de AGs, um *indivíduo* representa uma solução potencial para o problema, uma *população* representa um conjunto de indivíduos e as características relevantes do indivíduo em relação ao problema são chamadas *genes*. Indivíduos são avaliados em relação à capacidade de resolver o problema, ou *aptidão*, e essa capacidade é expressa numericamente pela *avaliação* do indivíduo, por meio de uma *função objetivo* (Michalewicz, 1998).

O processamento básico de um AG se inicia com a criação de uma população inicial, na qual os valores dos genes são determinados aleatoriamente. Na sequência, os indivíduos são avaliados, e são selecionados os mais aptos. O próximo passo é a criação de uma nova população a partir da utilização de *operadores genéticos* sobre os indivíduos selecionados da *geração* anterior. Além disso, certo percentual dos indivíduos mais aptos é mantido na nova população.

O procedimento continua até que seja alcançado um determinado número de gerações ou até que um determinado número de indivíduos tenha sido criado (Fig. 12.1).



Fig. 12.1 Processos básicos de um AG.

### 12.2.2 Operadores genéticos

Os operadores genéticos representam regras para a criação de novos indivíduos nos AGs. Os operadores clássicos definidos na literatura são o *cruzamento* e a *mutação*.

A mutação modifica aleatoriamente o valor de um gene. Esta operação tem a função de aumentar a diversidade genética da população e representa uma forma de tratar o problema de convergência para mínimos locais.

Já o operador de cruzamento atua combinando os genes de dois indivíduos para a criação de um novo indivíduo, que, dessa forma, herda características de seus pais.

Admitindo-se que a aptidão de um indivíduo é função de suas características, a combinação de genes entre os indivíduos mais aptos pode produzir novos indivíduos ainda melhores. Caso indivíduos menos aptos sejam gerados neste processo, a tendência é que eles não sejam selecionados para a criação da nova população.

Existem diversos operadores genéticos descritos na literatura (Michalewicz, 1994), porém a maioria deles consiste de variações dos operadores de cruzamento e mutação básicos, adaptados a problemas específicos.

## 12.3 Ajuste dos Parâmetros de Segmentação

### 12.3.1 Procedimento de ajuste

Neste trabalho, propõe-se um método baseado em AG para o ajuste de parâmetros de segmentação.

Cada indivíduo corresponde a uma solução possível, ou seja, a um conjunto de valores de parâmetros de segmentação. Cada gene representa um valor de um parâmetro específico. A avaliação de uma solução (indivíduo) é calculada comparando-se o resultado do procedimento de segmentação obtido a partir dela com uma segmentação de referência (Fig. 12.2).

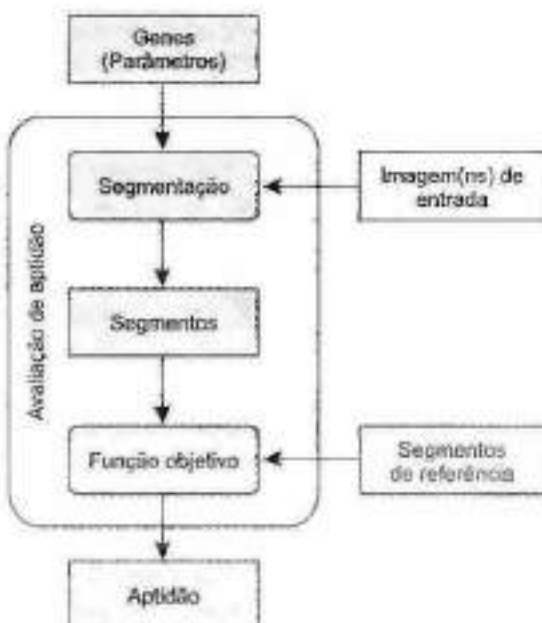


Fig. 12.2 Avaliação da aptidão

Os valores dos parâmetros (genes) que compõem o conjunto inicial de soluções (população inicial) são gerados aleatoriamente. Ao longo do processo de otimização, as melhores soluções (indivíduos mais aptos) são selecionadas, e novas soluções, criadas a partir delas (reprodução). A avaliação das soluções (avaliação de aptidão) é a base para a seleção das soluções que serão submetidas à reprodução.

O processo evolutivo termina após um número fixo de ciclos (gerações), e os valores dos parâmetros de segmentação (genes) da melhor solução (indivíduo mais apto) encontrada no último ciclo é o resultado final do procedimento de ajuste.

### 12.3.2 Reprodução

Os seguintes operadores genéticos foram utilizados (Davis, 1990; Michalewicz, 1994):

- *cruzamento de um ponto*: são trocados alguns dos valores de parâmetros de segmentação (genes) em duas soluções (indivíduos);
- *cruzamento aritmético*: é realizada uma combinação linear de valores de parâmetros em duas soluções;
- *mutação*: o valor de um parâmetro de segmentação é modificado de maneira aleatória; e
- *creep*: o valor de um ou mais parâmetros de segmentação numa solução é ajustado (adicionado ou subtraído) por um valor gerado aleatoriamente.

A escolha do operador genético a ser aplicado numa operação de reprodução considera valores predefinidos de probabilidade de aplicação para cada operador. Para evitar que o processo fique preso em mínimos locais, as probabilidades de aplicação dos operadores são interpoladas durante a evolução (Davis, 1990), diminuindo a probabilidade de cruzamentos e aumentando a probabilidade de mutação e creep ao longo da evolução.

### 12.3.3 Função objetivo

A tarefa de ajustar os parâmetros de um algoritmo de segmentação consiste em encontrar os valores que levem o algoritmo a produzir um resultado ótimo, medido a partir de um critério de qualidade apropriado. A qualidade de uma solução (aptidão de um indivíduo) deve refletir, de algum modo, o grau de similaridade entre a segmentação produzida a partir desses valores e uma segmentação de referência. Tal referência consiste de um conjunto de segmentos, tipicamente delimitados sobre a imagem analisada por um intérprete, que representam a sua percepção do que seja uma segmentação ideal. O que se procura é o conjunto de valores de parâmetros de segmentação que produza o resultado mais consistente com essa referência.

Em termos formais, dado um conjunto de segmentos  $S$ , um conjunto de valores dos parâmetros  $P$ , e a função objetivo  $F(S, P)$ , a tarefa do AG consiste em procurar o vetor de valores de parâmetros  $P_{opt}$  para qual  $F$  alcança o seu mínimo. O problema é formulado matematicamente pela Eq. 12.1.

$$P_{opt} = \arg \min_p [F(S, P)] \quad (12.1)$$

Seja  $S_i$  o conjunto de pixels pertencentes ao  $i$ -ésimo segmento de  $S$ , e  $O(P)_i$  o conjunto dos pixels pertencentes ao segmento produzido a partir de  $P$  que possui a maior interseção com  $S_i$ . A função objetivo é definida da seguinte maneira:

$$F(S, P) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\#(S_i - O(P)_i) + \#(O(P)_i - S_i)}{\#(S_i)} \quad (12.2)$$

onde "-" representa a operação diferença de conjuntos, "#(.)" o número de elementos (cardinalidade) de um conjunto, e  $n$  o número de segmentos em  $S$ . A Fig. 12.3 descreve

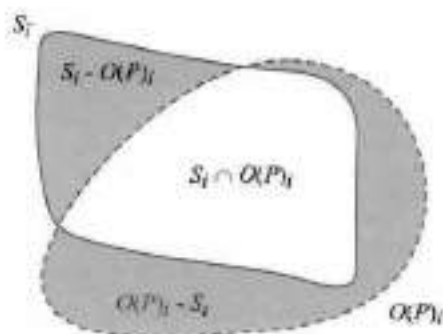


Fig. 12.3 Representação da função objetivo

funcão objetivo, que deve ser feito para cada indivíduo a cada geração, envolve a execução do procedimento de segmentação. Em vez de se segmentar toda a imagem de entrada, o que poderá ser muito oneroso computacionalmente, segmentam-se apenas recortes da imagem em torno de cada segmento de referência. Reduz-se, desta forma, consideravelmente o tempo de cálculo da função objetivo e do processo de ajuste como um todo. Na seção 12.5, avalia-se experimentalmente o impacto desse procedimento sobre a exatidão do método de ajuste.

## 12.4 Procedimento de Segmentação

O método de ajuste automático proposto neste trabalho pode ser aplicado em princípio a qualquer algoritmo de segmentação. A avaliação experimental do método, apresentada na Seção 12.5, restringe-se, contudo, a um algoritmo baseado na técnica de crescimento de regiões, proposto por Baatz e Schäpe (2000) e utilizado no software eCognition (Definiens, 2005). Esta seção tem por objetivo descrever sucintamente o algoritmo e apresentar algumas das características que afetam o ajuste de seus parâmetros, a ser discutido na Seção 12.5.

Trata-se de um procedimento iterativo de otimização local, que minimiza a heterogeneidade média dos segmentos gerados. A medida de heterogeneidade usada no algoritmo possui um componente espacial e um componente espectral. A heterogeneidade espectral é definida sobre os valores das respostas espectrais dos pixels contidos num segmento. Essa medida é proporcional à média ponderada do desvio padrão de cada banda.

A heterogeneidade espacial baseia-se em dois atributos de forma: *compactação* e *suavidade*. O grau de compactação é definido como a razão entre o perímetro do segmento e a raiz quadrada de sua área (número de pixels que contém). A suavidade é definida como a razão entre o perímetro do objeto e o perímetro do retângulo envolvente mínimo (*bounding box*).

Inicialmente cada segmento representa apenas um pixel da imagem e todos os pixels estão associados a algum segmento. Os segmentos crescem à medida que são unidos com seus vizinhos, e o menor aumento na heterogeneidade é utilizado como critério para a seleção do vizinho ao qual um segmento será unido. Para simular um crescimento paralelo, cada segmento é selecionado apenas uma vez a cada iteração.

O *fator de fusão* ( $f$ ) expressa o aumento de heterogeneidade resultante da união de dois segmentos. Antes de uma operação de união, o fator de fusão é calculado para cada um

pictoricamente a função objetivo proposta. A região com contorno sólido representa um segmento de referência  $S_i$ , a região com contorno tracejado representa  $O(P)_i$ . A função objetivo é dada pela média da razão entre a soma das áreas sombreadas e a área de  $S_i$ . Note que um casamento perfeito entre os segmentos de referência e a saída da segmentação corresponde a  $F=0$ .

É importante salientar que  $S$  não precisa cobrir toda a imagem. Basta tomar um conjunto de segmentos representativo do resultado que se espera da segmentação. O cálculo da

dos vizinhos do segmento selecionado. O vizinho para o qual o fator de fusão for mínimo é escolhido para a união. Contudo, a união só ocorre se o fator de fusão estiver abaixo de um determinado limiar, definido como o quadrado do *parâmetro de escala*, que denotaremos deste ponto do texto em diante com a letra  $\epsilon$ . O procedimento continua unindo segmentos até que nenhum segmento possa crescer mais.

O fator de fusão contém um componente para a heterogeneidade espectral ( $h_{cor}$ ) e outro para a heterogeneidade espacial ( $h_{forma}$ ) (Eq. 12.3). A importância relativa entre os componentes espacial e espectral é definida pelo *fator de cor* ( $w_{cor}$ ).

$$f = w_{cor} \cdot h_{cor} + (1 - w_{cor}) \cdot h_{forma} \quad (12.3)$$

A Eq. 12.4 mostra a formulação da heterogeneidade espectral, onde  $Obj1$  é o segmento selecionado,  $Obj2$ , o vizinho analisado, e  $Obj3$ , o segmento resultante da união de  $Obj1$  com  $Obj2$ . Nessa equação,  $c$  é o índice da banda espectral, e  $w_c$ , um peso arbitrário definido para a banda  $c$ ;  $\sigma_c^{Obji}$  é o desvio padrão dos valores dos pixels na banda  $c$ , considerando todos os pixels pertencentes ao segmento  $Obj_i$ , e  $n_{Obji}$  é o número de pixels em  $Obj_i$ , para  $i=1,2,3$ .

$$h_{cor} = \sum_c w_c \left( n_{Obj3} \cdot \sigma_c^{Obj3} \left( n_{Obj1} \cdot \sigma_c^{Obj1} - n_{Obj2} \cdot \sigma_c^{Obj2} \right) \right) \quad (12.4)$$

A heterogeneidade espacial é influenciada pelo grau de compactação do segmento e pela suavidade de sua borda (Eq. 12.5). A medida de heterogeneidade espacial tem, portanto, dois componentes: o componente relativo à compactação  $h_{compact}$  e o de suavidade  $h_{suave}$ . A importância relativa entre esses dois componentes é definida pelo *fator de compactação*,  $w_{compact}$ .

$$h_{forma} = w_{compact} \cdot h_{compact} + (1 - w_{compact}) \cdot h_{suave} \quad (12.5)$$

As Eqs. 12.6 e 12.7 mostram as formulações dos componentes de compactação e suavidade. Nessas equações,  $l_{Obji}$  é o perímetro dos objetos, e  $b_{Obji}$  o perímetro do correspondente retângulo envolvente mínimo, para  $i=1,2,3$ .

$$h_{compact} = n_{Obj3} \cdot \frac{l_{Obj3}}{\sqrt{n_{Obj3}}} \left( n_{Obj1} \cdot \frac{l_{Obj1}}{\sqrt{n_{Obj1}}} + n_{Obj2} \cdot \frac{l_{Obj2}}{\sqrt{n_{Obj2}}} \right) \quad (12.6)$$

$$h_{suave} = n_{Obj3} \cdot \frac{l_{Obj3}}{b_{Obj3}} \left( n_{Obj1} \cdot \frac{l_{Obj1}}{b_{Obj1}} + n_{Obj2} \cdot \frac{l_{Obj2}}{b_{Obj2}} \right) \quad (12.7)$$



O crescimento dos segmentos é condicionado, portanto, a um critério de heterogeneidade ajustável. Esse ajuste pode ser feito pela escolha do parâmetro de escala ( $\epsilon$ ), dos pesos das bandas espectrais ( $w_c$ ), do fator de cor ( $w_{cor}$ ) e do fator de compactação ( $w_{compact}$ ). O ajuste no parâmetro de escala ( $\epsilon$ ) influencia diretamente no tamanho dos segmentos gerados. Além disso, a relevância de cada banda espectral, a importância relativa entre forma e cor e entre compactação e suavidade, podem ser ajustadas por intermédio dos parâmetros do algoritmo.

## 12.5 Experimentos

Para avaliar o desempenho do método proposto, foi construído um protótipo em software na linguagem C++. O protótipo inclui a implementação do algoritmo proposto por Baatz e Schäpe (2000).

No protótipo, os seguintes parâmetros do AG são definidos num arquivo de configuração: número de gerações, tamanho da população e as probabilidades iniciais e finais de aplicação dos operadores genéticos. Assim, o ajuste do AG pode ser realizado sem a necessidade de reprogramação. Neste arquivo, também é possível definir o domínio de cada gene, assim como suas precisões decimais.

O método proposto prevê que um intérprete humano delimite manualmente na imagem um conjunto de polígonos, que representarão sua expectativa quanto ao resultado da segmentação. Esses polígonos formarão a referência a ser usada durante o ajuste dos parâmetros da segmentação. Essa referência tem o papel de capturar a subjetividade do intérprete na avaliação da segmentação. De fato, o processo cognitivo aplicado pelo intérprete ao identificar as fronteiras dos objetos que lhe são significativos na imagem é, via de regra, muito complexo e está representado no algoritmo de segmentação de modo apenas aproximado. Nada garante a existência de um conjunto de valores para os parâmetros de segmentação que produza um resultado minimamente consistente com a referência definida pelo intérprete. Dessa forma, a eventual incapacidade do AG de convergir para uma solução satisfatória pode decorrer da excessiva simplicidade do algoritmo de segmentação ou ainda de uma escolha excêntrica dos segmentos de referência por parte do intérprete.

Por esse motivo, os experimentos apresentados a seguir foram divididos em duas partes. Na primeira, eliminamos da análise a influência de fatores subjetivos e nos concentramos apenas em avaliar a capacidade do método de convergir para a solução ótima. Na segunda, avaliamos a capacidade do método proposto, em especial da função objetivo proposta, de capturar a percepção subjetiva do intérprete quanto à qualidade da segmentação.

### 12.5.1 Análise de convergência

Esta série de experimentos tem o propósito de testar a capacidade do AG de convergir para a solução que minimiza a função objetivo. Nesta análise, a solução ótima é conhecida, e a avaliação é feita comparando-a com a solução encontrada pelo AG.

### Imagens de entrada

Foram usadas imagens de dois sensores, ETM Landsat e Ikonos, produzidas em 2001 e 2002, sobre áreas distintas do Município do Rio de Janeiro. As imagens foram geradas a

partir das três bandas na faixa de frequência da luz visível, fundidas com a banda pancromática, e possuem resoluções espaciais de aproximadamente 15 m (Landsat) e 1 m (Ikonos). De cada cena foram extraídos dois recortes de  $256 \times 256$  pixels cobrindo áreas com diferentes coberturas de solo. As Figs. 12.4 e 12.5 mostram as imagens da área-teste da cena Landsat (Imagens 1 e 2) e as Figs. 12.6 e 12.7, os recortes da cena Ikonos (Imagens 3 e 4).

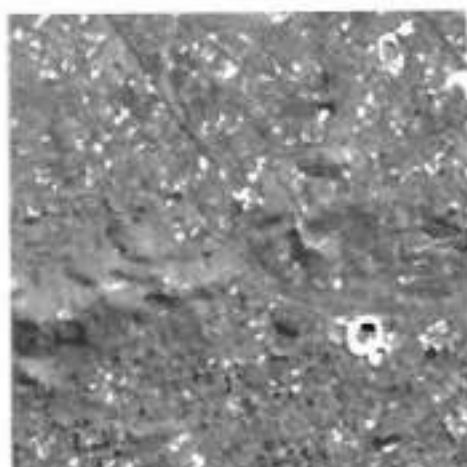


Fig. 12.4 Imagem 1 (Landsat ETM)



Fig. 12.6 Imagem 3 (Ikonos)

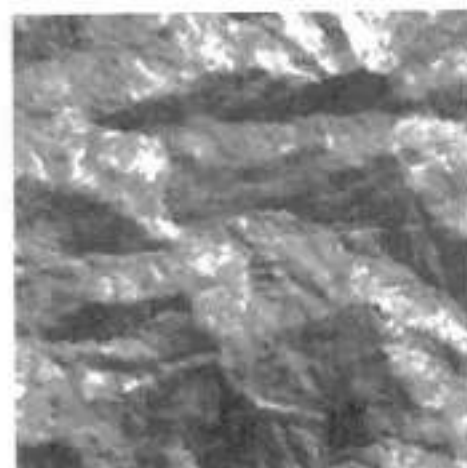


Fig. 12.5 Imagem 2 (Landsat ETM)



Fig. 12.7 Imagem 4 (Ikonos)

### Procedimento experimental

Para este experimento, a solução ótima deve ser conhecida *a priori*, tendo sido obtida da seguinte forma: o procedimento de segmentação foi executado sobre as imagens de teste usando valores predefinidos para os parâmetros, conforme apresentado na Tab. 12.1. Alguns dos

segmentos assim produzidos foram selecionados para representar a segmentação de referência. Neste caso, espera-se que o AG convirja para os valores da tabela, que produzem exatamente os segmentos de referência, implicando, portanto, uma aptidão igual a zero ( $F=0$ ).

Para cada experimento foram selecionados, para compor a referência, entre 5 e 10 segmentos distribuídos sobre a imagem de modo aproximadamente uniforme. A avaliação de desempenho do método foi feita comparando-se o resultado encontrado pelo AG com a referência.

Vários experimentos foram realizados a fim de sintonizar o AG para operar de modo robusto. Todos os resultados relatados e discutidos neste trabalho foram produzidos pelo AG operando com a seguinte configuração: população de 50 indivíduos, 40 gerações, com 10% dos indivíduos mais aptos mantidos de uma geração para a seguinte.

Durante a evolução, o parâmetro de escala pôde variar de 0 a 100, e os demais parâmetros, entre 0 e 1. A precisão para o parâmetro de escala ( $\epsilon$ ), peso de cor ( $w_{cor}$ ) e peso de compactação ( $w_{compact}$ ) foi de 0.01, e a precisão para os pesos de bandas ( $w_i$ ) foi definida em 0.1.

## Resultados

Os resultados obtidos nesta série de experimentos estão na Tab. 12.1. As colunas  $\epsilon$ ,  $w_{cor}$ ,  $w_{compact}$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ , e  $w_3$  mostram, na linha superior de cada experimento, em *italico*, os valores usados para produzir a segmentação de referência que constituem, portanto, a solução ótima. Os melhores valores encontrados pelo AG em cinco execuções são mostrados em **negrito** na linha inferior relativa a cada experimento. A coluna *aptidão* mostra o valor da função objetivo alcançado pelo GA em cada caso.

Nota-se que os valores de aptidão alcançados estão todos próximos a zero. Nas imagens Ikonos, houve uma discrepância ligeiramente maior nos experimentos 15 e 16. Tais discrepâncias podem ser parcialmente atribuídas à maior complexidade dos segmentos de referência.

Observa-se ainda que são pequenos os desvios dos valores de cada parâmetro relativamente à solução ótima. O desvio mais significativo que se nota no fator de compactação pode ser explicado pelo valor elevado do fator de cor (0,8). Por isso, o peso relativo da forma do objeto no processo de crescimento de regiões é reduzido e variações do fator de compactação acabam tendo pouca influência sobre o resultado da segmentação.

Nos experimentos 2, 8 e 9, o AG gerou segmentos idênticos à referência (valor de aptidão igual a zero). Contudo, os valores encontrados pelo AG foram distintos daqueles usados para produzir os segmentos de referência. Isso indica que o algoritmo de segmentação utilizado pode produzir resultados muito semelhantes a partir de valores diferentes de seus parâmetros. Outros resultados obtidos em nossos experimentos, não apresentados na Tab. 12.1, demonstraram que o AG é capaz de encontrar, nestes casos, mais de uma solução ótima.

### 12.5.2 Relação com a avaliação subjetiva do intérprete

A realização de uma segunda série de experimentos teve dois objetivos. O primeiro foi avaliar a capacidade do método proposto de encontrar soluções que produzam objetos significativos. Diferentemente da série de experimentos anteriores, nesta avaliação, os polígonos que representam segmentos de referência foram traçados manualmente pelo intérprete. Neste caso, não há, em princípio, uma solução ideal, que gere segmentos idênticos aos de referência.

**Tab. 12.1** Valores dos parâmetros usados na primeira série de experimentos e resultados correspondentes

Exp.	Imagem	$\epsilon$	$w_{cor}$	$w_{compact}$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	Aptidão
1	1	30,0	0,80	0,50	0,6	0,3	0,1	<b>0,09</b>
		27,7	<b>0,65</b>	0,33	0,6	0,3	0,1	
2	1	30,0	0,80	0,50	0,3	0,1	0,6	0,00
		25,4	0,69	<b>0,32</b>	0,3	0,1	<b>0,6</b>	
3	1	60,0	0,80	0,50	0,6	0,3	0,1	<b>0,02</b>
		44,2	<b>0,82</b>	<b>0,57</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	
4	1	60,0	0,80	0,50	0,3	0,1	0,6	<b>0,01</b>
		44,2	0,71	0,32	0,3	0,1	0,6	
5	2	30,0	0,80	0,50	0,6	0,3	0,1	<b>0,01</b>
		27,8	<b>0,76</b>	<b>0,38</b>	0,6	0,3	0,1	
6	2	30,0	0,80	0,50	0,3	0,1	0,6	<b>0,02</b>
		29,0	<b>0,70</b>	0,35	0,3	0,1	0,6	
7	2	60,0	0,80	0,50	0,6	0,3	0,1	<b>0,06</b>
		41,6	<b>0,56</b>	<b>0,14</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	
8	2	60,0	0,80	0,50	0,3	0,1	0,6	0,00
		53,7	<b>0,79</b>	0,47	0,3	0,1	0,6	
9	3	30,0	0,80	0,50	0,1	0,3	0,6	0,00
		29,7	<b>0,77</b>	<b>0,42</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	
10	3	30,0	0,80	0,50	0,3	0,6	0,1	<b>0,01</b>
		30,2	0,81	0,50	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>	
11	3	60,0	0,80	0,50	0,1	0,3	0,6	<b>0,02</b>
		58,8	<b>0,80</b>	<b>0,51</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	
12	3	60,0	0,80	0,50	0,1	0,3	0,6	<b>0,11</b>
		57,6	<b>0,74</b>	0,28	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,7</b>	
13	4	30,0	0,80	0,50	0,1	0,3	0,6	<b>0,03</b>
		26,2	<b>0,62</b>	<b>0,25</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	0,6	
14	4	30,0	0,80	0,50	0,3	0,6	0,1	<b>0,01</b>
		26,8	0,70	0,24	0,3	0,6	<b>0,1</b>	
15	4	60,0	0,80	0,50	0,3	0,6	0,1	<b>0,21</b>
		44,5	<b>0,65</b>	<b>0,24</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>	
16	4	60,0	0,80	0,50	0,1	0,3	0,6	<b>0,26</b>
		53,4	0,79	0,57	0,1	0,3	0,6	

O primeiro objetivo foi, em outras palavras, verificar se essa solução, apesar de distinta, é ainda similar à referência do ponto de vista subjetivo do intérprete. O segundo objetivo desses experimentos foi avaliar se a segmentação desejada para a imagem completa pode ser adequadamente representada por uma pequena amostra de segmentos de referência.

### Imagens de entrada

As imagens usadas na segunda série de experimentos foram produzidas por diferentes sensores, sobre áreas com diferentes usos. A Imagem 5 (Fig. 12.8) foi extraída de uma fotografia aérea, tomada sobre uma área residencial na Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro. As demais imagens foram extraídas do programa *GoogleEarth*: a Imagem 6 (Fig. 12.9) mostra

uma garagem de ônibus, também situada no Município do Rio de Janeiro, e a Imagem 7 (Fig. 12.10) apresenta uma área com tanques de armazenamento dentro de uma refinaria de petróleo no Município de Duque de Caxias, Estado do Rio de Janeiro. As três imagens possuem 400×400 pixels, padrão RGB com 24 bits (8 bits por banda).



Fig. 12.8 Imagem 5



Fig. 12.9 Imagem 6



Fig. 12.10 Imagem 7

### Procedimento experimental

Os experimentos desta série foram organizados da seguinte forma: sobre cada uma das três imagens de teste, o intérprete delimitou segmentos cobrindo diferentes objetos: respectivamente telhados de material cerâmico, ônibus numa garagem e tanques numa planta industrial. Em seguida, para cada imagem de teste, os segmentos delimitados foram organizados em três grupos (A, B e C), cada grupo com aproximadamente o mesmo número de segmentos. A distribuição dos segmentos entre os grupos foi aleatória. Em cada experimento, foram considerados apenas segmentos que representam objetos de uma única classe.

Em cada experimento realizado, um dos grupos de segmentos, que denominamos *Grupo de Treinamento*, foi selecionado para servir de referência para o GA durante a evolução dos parâmetros de segmentação. A solução obtida a partir deste grupo foi aplicada a toda a imagem e o valor da função objetivo foi calculado para os segmentos dos demais dois grupos, que denominamos *Grupo de Validação*. Três experimentos foram realizados para cada imagem, cada vez usando-se grupos de segmentos diferentes para treinamento e validação.

### Resultados

A Tab. 12.2 mostra os melhores resultados em três execuções do AG para cada experimento. A coluna *Imagem* indica a imagem usada em cada experimento; a coluna *Grupo* mostra o grupo de segmentos de treinamento. Os grupos são indicados por diferentes tons de cinza nas Figs. 12.11, 12.12 e 12.13 (grupo A: preto; grupo B: cinza-médio; grupo C: cinza-claro).

As colunas  $\sigma$ ,  $w_{cor}$ ,  $w_{comp}$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$  mostram os valores dos parâmetros gerados pelo AG (os genes dos indivíduos mais aptos). A coluna *Aptidão* contém os valores de aptidão calculados para os indivíduos mais aptos sobre o Grupo de Treinamento e sobre o Grupo de Validação.

Tab. 12.2 Resultados do segundo conjunto de experimentos

Exp	Imagem	Grupo	E	$w_{cor}$	$w_{compact}$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	Aptidão	
									Treinamento	Validação
1	1	A	13,8	0,15	0,70	0,4	0,2	0,4	0,21	0,45
2	1	B	16,6	0,48	0,57	0,5	0,4	0,1	0,28	0,33
3	1	C	14,6	0,24	0,54	0,5	0,1	0,4	0,19	0,33
4	2	A	64,4	0,41	0,59	0,1	0,2	0,7	0,48	0,68
5	2	B	66,3	0,51	0,50	0,1	0,7	0,2	0,51	0,56
6	2	C	75,3	0,44	0,66	0,4	0,6	0,0	0,45	0,78
7	3	A	58,1	0,63	0,66	0,0	0,1	0,9	0,38	0,65
8	3	B	36,6	0,56	0,63	0,5	0,1	0,4	0,28	0,49
9	3	C	41,1	0,37	0,63	0,1	0,7	0,2	0,39	0,83

A análise da tabela mostra que o AG chegou a resultados consistentes nos três experimentos para cada uma das imagens. Os valores de aptidão são mais altos que aqueles obtidos no conjunto de experimentos anterior (Seção 12.5.2), o que era esperado, uma vez que, como já discutido, não há como garantir que existam valores dos parâmetros de segmentação capazes de gerar segmentos idênticos aos delimitados manualmente.

O desempenho do AG foi comparado com o de busca aleatória, em que o mesmo número de soluções criadas pelo AG em cada experimento foi gerado com valores aleatórios para os parâmetros da segmentação. Os resultados da busca aleatória foram sempre inferiores, ou seja, os melhores indivíduos produzidos pela busca aleatória apresentaram valores de aptidão mais altos (piores) que os valores dos indivíduos mais aptos produzidos pelo AG.

As Figs. 12.11, 12.12 e 12.13 permitem a avaliação visual do desempenho do método. Elas mostram os segmentos delimitados pelo intérprete. As Figs. 12.14 a 12.19 mostram os segmentos gerados com soluções encontradas pelo AG. Estas figuras foram produzidas a partir de segmentações completas das imagens de teste, mas apresentam somente os segmentos correspondentes (com maior interseção) aos delimitados pelo intérprete. As Figs. 12.14, 12.15 e 12.16 mostram os piores resultados (respectivamente, experimentos 2, 5 e 9) enquanto as Figs. 12.17, 12.18 e 12.19 apresentam os melhores resultados (experimentos 3, 4 e 8).

Percebe-se, nessas figuras, uma grande similaridade entre os segmentos recortados manualmente pelo intérprete e aqueles produzidos pelo programa de segmentação a partir dos valores de parâmetros encontrados pelo AG. Mesmo para a primeira imagem (Fig. 12.14), em que os segmentos de referência apresentam maior heterogeneidade, os resultados são visualmente consistentes.

Vale lembrar que os resultados apresentados dizem respeito a três ciclos de 40 gerações. Eventualmente poderia ser alcançado um resultado melhor, se o método proposto fosse executado por mais ciclos e/ou por mais gerações. Não há, contudo, garantia de que esse investimento de tempo de processamento seria compensado com uma correspondente melhoria do resultado final. Esta incerteza é típica de métodos estocásticos de otimização como os AGs.

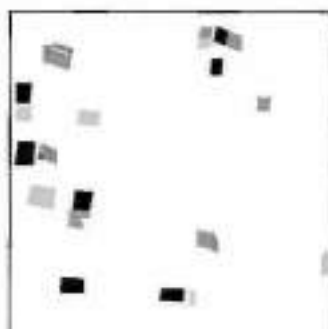


Fig. 12.11 Segmentos delimitados sobre a imagem 5



Fig. 12.12 Segmentos delimitados sobre a imagem 6

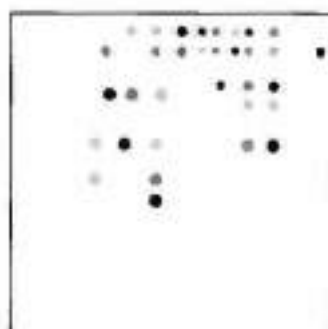


Fig. 12.13 Segmentos delimitados sobre a imagem 7

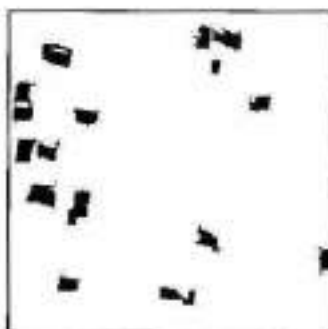


Fig. 12.14 Piores resultados para a imagem 5



Fig. 12.15 Piores resultados para a imagem 6

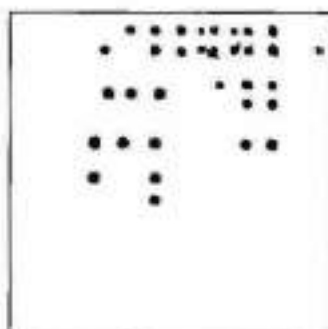


Fig. 12.16 Piores resultados para a imagem 7

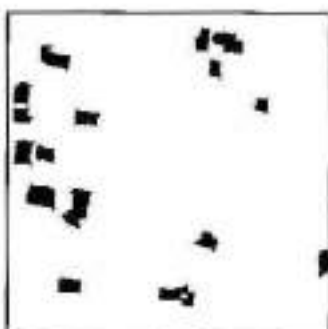


Fig. 12.17 Melhores resultados para a imagem 5



Fig. 12.18 Melhores resultados para a imagem 6

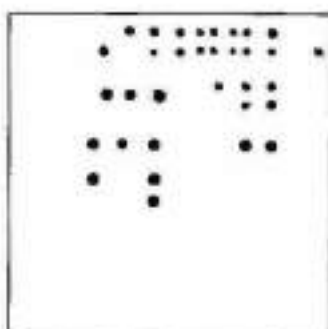


Fig. 12.19 Melhores resultados para a imagem 7

## 12.6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um método para o ajuste automático dos valores de parâmetros de segmentação através de algoritmos genéticos. Parâmetros de segmentação foram codificados nos genes de indivíduos do AG, e a aptidão desses indivíduos foi calculada por meio da comparação dos segmentos gerados com segmentos de referência.

Duas séries de experimentos foram realizadas para avaliar o desempenho da metodologia proposta, utilizando imagens de diferentes sensores em áreas com coberturas do terreno bastante distintas.

Em todos os experimentos em que a solução ideal era conhecida *a priori*, o AG convergiu para soluções muito próximas da solução ótima. Em alguns casos, o AG foi capaz de encontrar mais de uma solução com resultados praticamente idênticos à referência. Compreende-se que este comportamento está relacionado com algumas especificidades do algoritmo de segmentação utilizado. Apesar de essa característica do algoritmo de segmentação dificultar a convergência, o AG foi capaz de encontrar soluções adequadas. Essa observação, associada ao fato de que o desempenho medido foi semelhante para imagens de diferentes sensores, cobrindo áreas com características distintas, evidencia a robustez da metodologia. Cabe ainda ressaltar que os parâmetros do AG foram mantidos fixos ao longo de todos os experimentos relatados neste trabalho.

A análise experimental demonstrou também que o método proposto consegue expressar numericamente e, portanto, de modo objetivo, a percepção subjetiva do intérprete quanto à qualidade da segmentação. Por meio de um pequeno conjunto de segmentos delimitados manualmente, o intérprete pôde indicar a saída esperada do programa de segmentação, e o método de ajuste foi capaz de produzir, em todos os experimentos realizados, um resultado visualmente consistente com o esperado. Os experimentos demonstraram ainda que o AG foi sempre superior à busca aleatória, convergindo mais rapidamente para uma boa solução.

Os resultados experimentais indicam a viabilidade de se utilizar a metodologia como ponto de partida para a criação de operadores de alto nível, para a extração automática de classes específicas de objetos em imagens de sensores remotos. Nesse caso, um dos maiores benefícios seria permitir a adaptação dos operadores a imagens de diferentes sensores, com diferentes características espaciais ou espectrais.

Estão sendo consideradas ainda alternativas para melhorar a eficiência computacional do protótipo ora implementado. Atualmente, com um processador Pentium 4, 1.8GHz, cada experimento envolvendo três ciclos de 40 gerações foi executado em aproximadamente 3,5 horas. O processamento paralelo dos indivíduos numa geração é uma possibilidade. Melhorias na arquitetura do algoritmo genético também podem ajudar, como a utilização dos conceitos de algoritmos culturais (Becerra, 2005) e de co-evolução (Davis, 1990). De qualquer forma, é certo que o permanente progresso da tecnologia na área de hardware e software também contribuirá para a redução dos tempos de processamento.

## 12.7 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido da FINEP e da FAPERJ para a realização da pesquisa da qual resultou o presente trabalho.

## 12.8 Referências Bibliográficas

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



- BECERRA, R. L.; COELLO, C. A. C. Use of domain information to improve the performance of an evolutionary algorithm. In: *Workshop on Genetic and Evolutionary Computation*, 2005, Washington. *Proceedings...* Washington, pp. 362-365, 2005.
- BHANU, B.; MING, J. C.; LEE, S. Closed-loop adaptive image segmentation. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. *Proceedings...* 1991.
- BHANU, B.; LEE, S. *Genetic learning for adaptive image segmentation*. London: Lwer Academic Publishers, 1994.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What is wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GIS-Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, 6, pp. 12-17, 2001.
- CREVIER D.; LEPAGE, R. Knowledge-based image understanding system: A survey. *Computer vision and image understanding*, 67(2), pp. 161-185, 1997.
- DAVIS, L. *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- DARWIN, C. *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London: John Murray, 1859.
- DEFINIENS, eCognition Version 4.0. *eCognition User Guide*, 2005. Disponível em: <<http://www.definiens.com>> Último acesso em: 2 de dezembro de 2005.
- ESPINDOLA, G. M.; CÂMARA, G.; REIS, I. A.; BINS, L. S.; MONTEIRO, A. M. Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27 (14/20), pp. 3035-3040, June 2006.
- KARTIKEYAN, B.; SARKAR, A.; MAJUMDER, K. L. A segmentation approach to classification of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 9, pp. 1695-1709, 1998.
- KUEBLBECK C.; WAGNER, T. Automatic configuration surface inspection systems. In: A. RAVISHANKAR, Rao A.; CHANG, Ning (Eds.). *Proceedings...* San Jose: SPIE: Machine Vision Applications in Industrial Inspections V, v. 3029, 1997.
- MATSUYAMA, T. Expert system for image processing, analysis, and recognition; declarative knowledge representation for computer vision. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 86, pp. 81-171, 1993.
- MEINEL, G.; NEUBERT, M. A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. In: *ISRPS Annual Conference, Istanbul, Turkey*. *Proceedings...* Istanbul: pp. 19-23, 2004.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. New York: Springer-Verlag, 1994.
- SCHNEIDER, W.; ECKSTEIN, W.; STEGER, C. Real-time visualization of interactive parameter changes in image processing systems. In: GRINSTEIN, Georges G.; ERBACHER, Robert F. (Eds.) *Visual Data Exploration and Analysis IV*. *Proceedings...* SPIE, v. 3017, pp. 286-295, 1997.
- ZHANG, Y. A survey on evaluation methods for image segmentation. *Recognition Letters*, v. 29, n. 8, pp. 1335-1346, 1996.
- \_\_\_\_\_. Evaluation and comparison of different segmentation. *Recognition Letters*, v. 18, n. 10, pp. 963-974, 1997.

## Utilização de Dados de SIG para a Obtenção de Objetos

Kristin Leukert

### Resumo

Como introdução ao tema "Utilização de dados de SIG para a extração de objetos", foram apresentados problemas gerais a serem considerados, que resultam de diferenças das definições de objetos SIG em catálogos de objetos e na representação de objetos do mundo real em imagens. Os dados SIG disponíveis podem ser úteis em diferentes níveis da extração de objetos. Para isto foi fornecida uma visão de conjunto sobre métodos seleccionados e apresentados alguns exemplos práticos com o software eCognition. Um grande número de pesquisas na área da obtenção de dados SIG a partir da informação de imagens, confirma a tendência de se combinar os mais diversos métodos de interpretação e integrar dados adicionais, como por exemplo a utilização de dados SIG. Especialmente para manter a continuidade de dados SIG, o uso dos dados existentes é de grande interesse.

### 13.1 Introdução

O registro e a atualização dos dados de SIG é uma tarefa dispendiosa em tempo e custos. Ao lado de procedimentos clássicos da obtenção de dados, como por exemplo registros terrestres ou digitalização de mapas analógicos, usa-se, também, para a redução de custos, modernos procedimentos, por exemplo, do sensoriamento remoto. No SR dispõe-se de sensores com resolução cada vez superior, que são indicados para a obtenção dos objetos a partir de dados de SIG. Assim, por exemplo, dados do satélite Ikonos estão disponíveis em resoluções de 1 m no modo pancromático e 4 m no modo multiespectral. A interpretação de imagens com os procedimentos clássicos baseados em *pixels*, como a classificação multiespectral supervisionada, fornece geralmente resultados insatisfatórios para dados de imagens com alta resolução. Novas concepções de classificação resumem os *pixels* de áreas homogêneas em segmentos. Esses procedimentos baseados em objetos, fornecem muitas opções incluindo contexto ou outras informações adicionais, como, por exemplo, a inclusão de modelos digitais de terreno (DTM) ou dados SIG disponíveis na classificação.

Este capítulo dá uma visão de conjunto sobre as possibilidades potenciais de se incluir dados SIG, já disponíveis na extração de objetos, em diferentes planos e tipos do processo de classificação. A seguir são apresentados os métodos seleccionados e alguns exemplos de utilização do eCognition, um software de análise de imagens baseado em objetos, da empresa Definiens (<http://www.definiens-imaging.com/ecognition>).

### 13.2 Aspectos Gerais da Obtenção de Dados de SIG a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto

Durante a obtenção dos dados de SIG a partir de dados de SR, ocorrem algumas dificuldades fundamentais, que precisam ser consideradas na extração de objetos. Essas dificuldades são devidas à diferença resultante das definições de dados SIG em catálogos de tipos de objetos e no registro dos objetos representados. A seguir as dificuldades são esclarecidas.



Fig. 13.1 Visualização diversificada de uma classe de objetos (telhados de casas: diferentes formas e cores)

- Objetos de uma determinada classe possuem uma visualização variável na natureza e, portanto, também na imagem. A Fig. 13.1 mostra um recorte de uma foto aérea digital (FAD) com telhados de casas em diferentes formas e cores.

- Existe uma confusão espectral entre classes de objetos, isto é, há a possibilidade de separar as classes entre si equivocadamente no espaço de atributos;

- Determinados tipos de objetos e atributos não podem ser extraídos da imagem, ou seja, são necessárias informações adicionais;

- As classes de objetos desejadas não são idênticas às classes de reflexão. A classe de objeto "estação de tratamento de esgoto", por exemplo, aparece à esquerda na Fig. 13.2 em muitos objetos individuais que possuem diferentes características espectrais. A classe de objeto "campo agrícola" aparece à direita na Fig. 13.2 em muitas classes de reflexão e com diferentes texturas;

- Objetos espectralmente semelhantes pertencem, conforme os arredores/vizinhança, a diferentes classes de objetos. Usando-se exclusivamente suas características espectrais, as árvores em jardins ou parques não poderão ser discriminadas de árvores na floresta. Esta discriminação pode ser melhorada adicionando-se informação contextual.

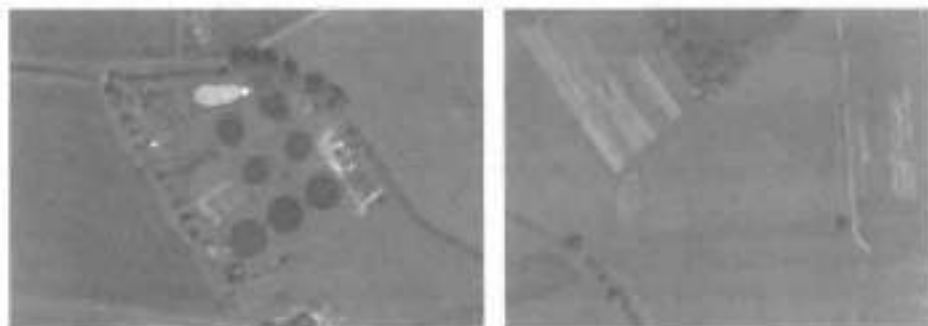


Fig. 13.2 Classes de objeto segundo o catálogo de tipos de objeto não coincidem com classes de reflexão (à esquerda: estação de tratamento de esgoto; à direita: campo agrícola)

As dificuldades acima listadas poderão ser em parte eliminadas por meio, p. ex., da inclusão de informações adicionais e da escolha de classes de reflexão espectrais que, após a classificação, podem ser resumidas a classes de objetos de acordo com um catálogo de tipos de objetos.

### 13.3 Uso de Dados em SIG para a Obtenção de Objetos

Em muitos locais já estão disponíveis dados em SIG que podem ser incluídos como informação adicional na extração de objetos em diferentes planos do procedimento. A inclusão de dados em SIG como informação prévia na obtenção de objetos possibilita novas opções, como p. ex., a automatização de uma classificação multispectral verificada através da definição automática de áreas de treinamento a partir de dados SIG. A utilização de conjuntos de dados já existentes é especialmente indicada para a continuidade de dados SIG. A seguir é apresentada uma visão global dos métodos selecionados para uso de dados SIG visando à obtenção de objetos, ilustrados com alguns exemplos usando o software eCognition.

#### 13.3.1 Segmentação

A utilização de dados SIG na segmentação de imagens permite, p. ex., uma interpretação baseada em parcelas. A Fig. 13.3 mostra o resultado de uma segmentação de imagem usando o eCognition, na qual os dados de imagem foram segmentados exclusivamente com dados em SIG. No eCognition, a segmentação de canais individuais (espectrais bem como temáticos) como p. ex. dados SIG, pode ser com diferentes ponderações. Na segmentação representada na Fig. 13.3, os canais espectrais foram ponderados com zero e a camada SIG com um, de modo que somente foram segmentados os objetos que correspondessem geometricamente e exatamente aos objetos SIG. Nos segmentos formados se encontram, no entanto, muitas classes de reflexão diferentes, como mostra o exemplo da estação de tratamento de esgoto. Para a obtenção de objetos com características espectrais, este tipo de segmentação é inadequado. Ela pode ser utilizada como plano de agregação superior ou como base para análises baseadas em parcelas (p. ex., determinação do grau de impermeabilização).

A Fig. 13.4 mostra uma segmentação de imagem com eCognition, na qual, além



Fig. 13.3 Segmentação de dados de uma foto aérea digital usando apenas dados de SIG (software eCognition)



Fig. 13.4 Segmentação de dados de uma foto aérea digital, com dados SIG (software eCognition)

da camada de SIG, também são incluídos os dados de imagem multiespectral para a formação de segmentos. Em eCognition, todos os canais de imagem e a camada de SIG são ponderados igualmente. Os segmentos formados são geralmente menores do que os objetos de SIG, visto que as diferentes classes de reflexão são consideradas. Dentro da estação de tratamento de esgoto, por exemplo, os tanques de purificação individuais são constituídos como um segmento. Após uma classificação, os segmentos podem ser resumidos a uma classe de objetos de acordo com o catálogo de objetos que é a sua base.

### 13.3.2 Redução do espaço de busca

Um procedimento para a redução do espaço de busca é a aplicação de máscaras. Fazendo-se máscaras, certos tipos de objetos serão mascarados e os passos de processamento seguintes somente ocorrem sobre essas máscaras. As máscaras SIG podem ser produzidas com a ajuda de dados. Antes de efetuar o mascaramento com dados SIG, estes devem ser testados no que se refere à sua atualidade e correção. Um mascaramento pode reduzir classificações potencialmente errôneas entre classes similares. Heipke e Straub (1999), para determinar as assinaturas espectrais de superfícies de vegetação, produziram, como primeiro passo, uma máscara de vegetação baseada num modelo digital de paisagem (1), de modo que os passos de processamento seguintes se limitaram às superfícies vegetadas.

A Fig. 13.5 mostra o exemplo do resultado de uma classificação, que foi executada com ajuda de máscara. Nas fotos aéreas digitais devem ser classificadas as classes "área verde urbana" e "área impermeabilizada". Inicialmente ocorreu o mascaramento da classe "área não construída" com ajuda de dados SIG. Desta forma não podem ocorrer classificações errôneas com a classe "área verde", já que estas áreas foram eliminadas pela máscara. A seguir a máscara "área construída" foi classificada pelo algoritmo de vizinho mais próximo contido no software aplicativo eCognition. Para uma classificação de vizinho mais próximo, são necessárias áreas de treinamento, tal como numa classificação multiespectral, baseada em *pixels*. Para fazer isto, no pacote eCognition podem ser usados os objetos previamente segmentados, de modo que não haja necessidade de uma delimitação manual das áreas de treinamento. A imagem inferior da Fig. 13.5 mostra a hierarquia de classes correspondente ao mascaramento no eCognition.

### 13.3.3 Classificação multiespectral supervisionada

Numa classificação multiespectral não supervisionada os *pixels* de imagem são associados a diferentes classes a partir de informações obtidas em diferentes áreas-teste. Até o momento, a definição das áreas-teste ocorre geralmente de forma manual. Dados SIG disponíveis podem ser aproveitados como áreas-teste para a classificação multiespectral supervisionada. Walter (1998) assume que o número de objetos SIG registrados erroneamente e o número de modificações no mundo real são pequenos em relação ao número de todos os objetos SIG de um conjunto de dados. Se forem geradas áreas de treinamento, a partir de dados SIG já existentes, obtém-se uma grande quantidade, porém com qualidade inferior, de áreas de treinamento. No caso

---

(1) Modelo digital de paisagem básico: modelo digital de paisagem básico de ATKIS (sigla em alemão do Sistema de Informações Topográficas-Cartográficas Oficial - n.d.t.).



Fig. 13.5 Mascaramento com janela de dados SIG (software eCognition)

da definição manual das áreas de treinamento, obtém-se uma pequena quantidade com alta qualidade. O problema na combinação de dados SIG com dados de imagem é a concordância geométrica. Os dados SIG são preparados de forma tal que as áreas de treinamento não contenham *pixels* mistos. Para garantir isto, efetua-se uma redução das áreas de treinamento por meio do cálculo de uma transição (*buffer*) em torno dos objetos SIG. A definição de áreas de treinamento a partir de dados SIG pode ser automatizada, para que se possa ganhar tempo, em relação à escolha manual de áreas de treinamento (Walter, 1998).

Nos dados de imagem com alta resolução, algumas classes de objetos possuem uma visualização muito heterogênea. Nas áreas construídas, p. ex., ocorrem muitas e diferentes classes de reflexão, tais como prédios, jardins e superfícies impermeabilizadas. Aqui se levanta a questão sobre o possível grau de heterogeneidade das áreas de treinamento para se obter uma classificação correta, ou se há disponíveis dados SIG adequados, com as classes de objetos correspondentes, que possam ser usados como áreas de treinamento.

#### 13.4 Outras Opções de Utilização de Dados SIG para a Obtenção de Objetos

A seguir são apresentadas sucintamente outras opções de utilização de dados SIG para a extração de objetos.

### 13.4.1 Conhecimento de contexto

Dados SIG podem fornecer um importante conhecimento do contexto para a obtenção de objetos. Baumgartner et al. (1999) descrevem como o contexto pode colaborar na obtenção de estradas a partir de imagens. O modelo de estradas aplicado é complementado pelo contexto, ao lado de características radiométricas, geométricas e topológicas. Construções, árvores e veículos (os assim denominados "objetos de fundo"), podem apoiar em parte a extração de estradas, porém podem dificultar esta extração por coberturas dos alvos como sombras. Assim é efetuada uma modelagem global das ações recíprocas entre estradas e objetos de fundo. Ruskoné et al. (1996) também descrevem o uso de contexto para a obtenção de estradas. Aqui são usados veículos para a extração de estradas.

### 13.4.2 Concepções baseadas em modelos

Existem atualmente vários sistemas baseados em conhecimentos, sendo que o modelo nos quais se baseiam é complementado por meio de conhecimentos obtidos por mapas ou SIG. A interpretação de dados de imagem pode ser automatizada pelo uso de conhecimentos *a priori*. Tönjes (1999) descreve um sistema de análise que avalia o modelo digital de paisagem básico. O conhecimento é implementado sob forma de redes semânticas. O modelo digital de paisagem básico é considerado um sensor especial que fornece, ao invés da informação de imagem, uma descrição simbólica e semântica dos objetos. Um outro sistema que utiliza redes semânticas e conhecimentos a partir de mapas ou SIG foi apresentado por Quint (1997). Os dados de imagem utilizados são fotos aéreas e o conhecimento de mapas provém do mapa topográfico geral da Alemanha (DGK) na escala 1:5.000.

### 13.4.3 Pós-classificação

Numa pós-classificação, os dados de SIG podem fornecer informações complementares para refinar o resultado da classificação. Um sistema baseado em conhecimentos no qual, numa pós-classificação, são usados dados de SIG, foi apresentado por Kontoes et al. (1993). As classes de objetos que foram adquiridas exclusivamente a partir de informações da imagem, são refinadas com a ajuda de dados de SIG. Para a determinação das probabilidades de ocorrência de diferentes tipos de uso do solo agrícola, foram utilizadas informações sobre os tipos de solos e as distâncias até a rede de estradas.

A Fig. 13.6 mostra um exemplo de uma pós-classificação baseada em dados SIG existentes. Com a ajuda de dados SIG, a classe "área construída" deverá ser reclassificada como "áreas verdes urbanas", naqueles setores que foram classificados como "áreas verdes". Para isto é formulado o seguinte conhecimento:

- Objetos que nas áreas construídas (obtidas de SIG) estão classificados como "área verde" são reclassificados para "área verde urbana".
- Nas áreas construídas não existem "terras agricultáveis" (problema da similaridade espectral com ruas e telhados de casas).

No software eCognition esse conhecimento pode ser integrado num nível de segmentação mais grosseiro, através de relações com as assim denominadas "superclasses". A descrição de classes na Fig. 13.6 determina para a "área verde urbana" a existência da superclasse "construção", que foi obtida de dados SIG.

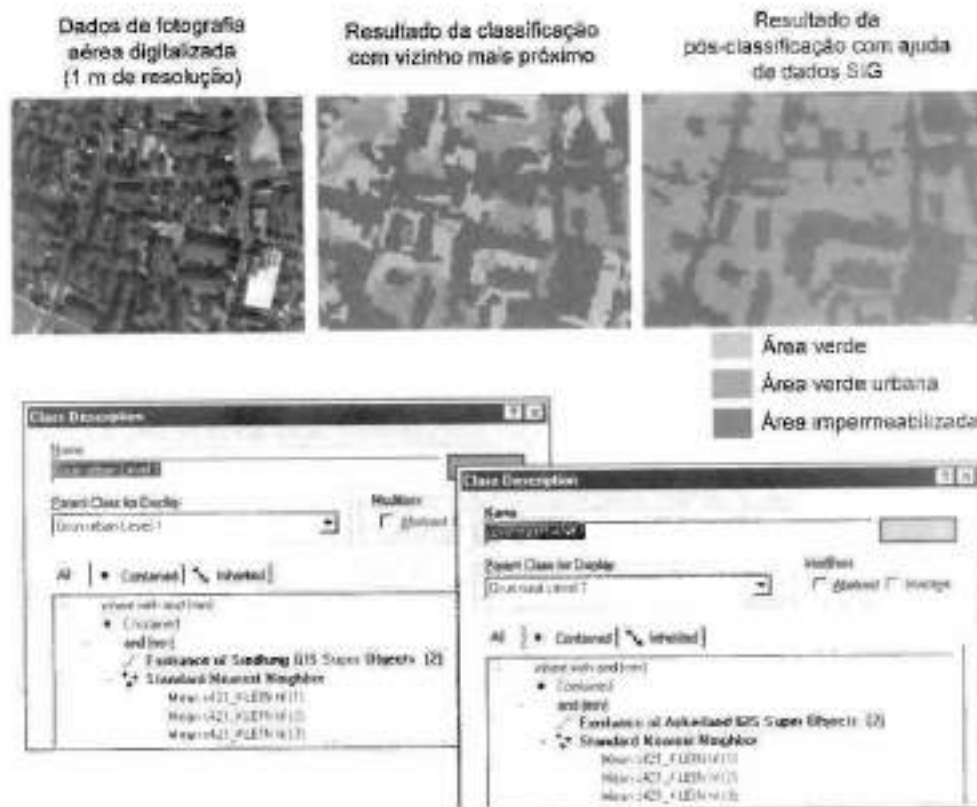


Fig. 13.6 Exemplo de uma pós-classificação no setor "área construída" com ajuda de dados SIG (software eCognition)

#### 13.4.4 Controle de qualidade

Para se avaliar o método, ou seja, a qualidade de uma obtenção de objetos, poderão ser usados dados SIG, desde que haja uma efetiva "verdade do terreno". Inicialmente deve ser testado e avaliado o conjunto de dados SIG de referência, no que tange à atualidade e correção. Na avaliação da qualidade de extração, frequentemente são usadas interpretações visuais. Faltam ainda procedimentos automáticos para o controle de qualidade com critérios de qualidade adequados para a obtenção de objetos. A qualidade de uma classificação baseada em *pixels* pode ser descrita com a ajuda de medidas estatísticas. Isto porém não permite nenhuma afirmação sobre a qualidade relativa aos objetos (Walter, 1999).

#### 13.5 Referências Bibliográficas

BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. *Automatische Strassenextraktion auf Grundlage von verschiedenen Auflösungsstufen, Netzbildung und Kontext*. PFG 1/1999, pp. 5-17, 1999.



- HEIPKE, Ch.; STRAUB, B. M. Towards the automatic GIS update of vegetation areas from satellite imagery using digital landscape model as prior information. In: Automatic extraction of GIS objects from digital imagery, München. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 32, part 3-2W5, pp. 167-174, 1999.
- KONTOES, C.; WILKINSON, G. G.; BURRILL, A.; GODOFFREDO, S.; MÉGIER, J. An experimental system for the integration of GIS data in knowledge-based image analysis for remote sensing of agriculture. *Internat. Journal of Geographical Information Systems*, v. 7, n. 3, pp. 247-262, 1993.
- QUINT, F. MOSES. A structural approach to aerial image understanding. In: *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II)*. Monte Verità, Birkhäuser Verlag Basel, pp. 323-332, 1997.
- RUSKONÉ, R.; GUIGUES, L.; AIRAULT, S.; JAMET, O. Vehicle detection on aerial images: a structural approach. In: *Proceedings of 13th International Conference of Pattern Recognition*, v. 3, pp. 900-904, 1996.
- TÖNJES, R. *Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern*. VDI Verlag Düsseldorf, reihe 10, n. 575, 1999.
- WALTER, V. Automatic classification of remote sensing data for GIS database revision. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Stuttgart, v. 32, part 4, pp. 641-648, 1998.
- \_\_\_\_\_. Automated GIS data collection and update. In: FRITSCH, D.; SPILLER, R. (Ed.) *Photogrammetric Week '99*. Herbert Wichmann, Heidelberg, pp. 267-280, 1999.

## Utilização de Métodos do Sensoriamento Remoto e SIG para a Caracterização de Ambientes: uma Contribuição à Implementação das Diretrizes de Água da União Européia

Markus Möller, Matthias Rosenberg e Martin Volk

### 14.1 Colocação do Problema

As diretrizes de água da União Européia que foram publicadas no final do ano 2000 (WRRL) objetivam assegurar, ou seja, alcançar um estado, ao menos bom de todos os recursos hídricos: uma aplicação combinada de regras de emissão e captação bem como sobre o gerenciamento de redes de drenagem. Desta forma, estas diretrizes incluem o princípio da proteção integrada das águas, ou seja, refere-se à proteção das águas de profundidade, águas superficiais, e comunidades de vida aquática (proteção qualitativa e quantitativa das águas, concepção ecológica e econômica). As instituições no setor de água terão a tarefa de, nos próximos 10 anos e com base em diagnósticos e análises, apresentar planos de manejo e programas de medidas para unidades de bacias hidrográficas (p. ex., área de abrangência das bacias dos rios Donau e Elbe).

A partir da consideração das áreas de bacias hidrográficas, são introduzidas novas concepções na política de águas da Alemanha. Os sistemas fluviais devem ser considerados como componentes interativos da paisagem, visto que, as bacias hidrográficas junto com os seus canais não alterados se comunicam por meio de fluxos de substâncias associadas às águas na superfície e subterrâneas. Como tarefa principal é considerada a diminuição de entradas difusas de nutrientes na área da respectiva bacia hidrográfica, que muitas vezes estão associadas à utilização do solo pela agricultura. A partir disso, deriva a exigência de que os parlamentos nacionais sejam obrigados a preparar instrumentos legais que permitam às autoridades atuar mais efetivamente do que até o momento, contra a introdução difusa de substâncias nutrientes. Até o momento, as diretrizes anteriores de proteção às águas colidiram especialmente com a política agrária européia (Gebhardt, 2000, Leymann 2001).

A seção Ecologia Aplicada da Paisagem do Centro de Pesquisa Ambiental Halle-Leipzig Ltda. (UFZ) desenvolve com base na WRRL, no âmbito de um projeto abrangente, um sistema hierárquico de parâmetros e indicadores para a pesquisa e avaliação da mudança de uso do solo e os seus efeitos sobre as funções da paisagem. Os trabalhos seguem uma concepção originada hierarquicamente e foram executados na área-teste bacia do rio Saale. Um ponto fundamental para tanto foi a derivação de sistemas para o uso do solo adequado à respectiva localidade e para diferentes tipos de paisagem. Assume-se para tanto que o uso do solo adequado à respectiva localidade resultará numa diminuição de carga difusa de nutrientes.

Um importante pré-requisito para um gerenciamento bem sucedido de uma bacia hidrográfica é uma caracterização detalhada de localidades, em base da qual podem-se derivar os parâmetros para modelagem. A presente contribuição apresenta, a partir do exemplo de um setor da bacia do rio Saale (Parthe), uma concepção orientada a objeto, ou seja, fundamentada em conhecimento, com base em métodos de SIG e SR, sendo que esta concepção permitiu a derivação dos parâmetros de localização necessários. A qualidade das derivações depende fortemente da disponibilidade e plausibilidade dos dados de sensoriamento remoto e dados adicionais.

## 14.2 Caracterização da Área de Estudos

Em conformidade com a concepção hierárquica do projeto, a caracterização da drenagem numa primeira fase, ocorreu inicialmente em bacias menores com diferentes áreas (Schnellbach: aprox. 8 km<sup>2</sup>, Parthe: 360 km<sup>2</sup>, Weisse Elster, aprox. 5.000 km<sup>2</sup>).

A área de aproximadamente 24.000 km<sup>2</sup> que perfaz a bacia do rio Saale (Fig. 14.1), estende-se por quatro Estados da R. F. da Alemanha (Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt e Thüringen) e apresenta uma estrutura de uso da terra bastante variada. Diversos conflitos resultaram da sobreposição de exigências de uso do solo por parte da indústria, das empresas de mineração, da agricultura intensiva bem como da urbanização, os quais, em muitos segmentos do rio, influenciam a relação íntima do rio e sua planície aluvial. A área da bacia do rio Saale inclui tanto regiões com Loess como relevo montanhoso médio, sendo que por isso, em vários setores da bacia, devido às diferentes condições do relevo, solo e clima, há um potencial de perigo diferenciado no que se refere à lixiviação de substâncias nutritivas através de águas subterrâneas e superficiais. A situação de estresse em função de cargas orgânicas nutrientes e nocivas no rio Saale melhorou bastante nos últimos anos. Não obstante, este rio contribui ainda – em relação à extensão da sua bacia e à sua população total – com elevado percentual da carga de nutrientes para o rio Elbe. As cargas de fósforo e nutrientes que são introduzidas no rio Elbe, puderam ser fortemente diminuídas nos últimos 10 anos. A redução dessas entradas é graças, especialmente, à minimização das entradas de nitrogênio de efluentes industriais diretos e a partir de estações de tratamento de esgoto municipais (Behrendt et al., 2001). O percentual de efluentes difusos, que hoje corresponde a aproximadamente 70%, deverá ser reduzido nos próximos anos por meio de um

gerenciamento integrado da área da bacia. O projeto conjunto deverá fornecer contribuições essenciais para o desenvolvimento do conceito de gerenciamento.

A área da bacia do rio Parthe (aprox. 300 km<sup>2</sup>) a leste da área da bacia do rio Saale, caracteriza-se por relevos de colinas do Permiano, regiões de antigas morainas e planícies férteis com solos de loess arenoso. As estruturas da paisagem e o seu equilíbrio estão fortemente comprometidos pelo uso para

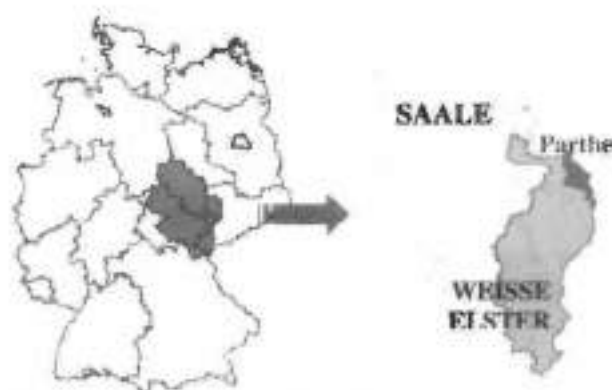








Fig. 14.1 Localização das áreas de pesquisa

mineração (extração de solos e cascalho fluvial), indústria e agricultura intensiva. O percentual de utilização agrícola do solo corresponde a aproximadamente 50% da área da bacia do rio Parthe. Do ponto de vista climático esta região possui uma temperatura anual média de 8,5°C e uma precipitação média de 570 mm. Tipos de solos predominantes são com horizonte B vértico (*Braunerden*) e com horizonte B textural (*Parabraunerden*) (Steinhardt e Volk, 2000).

### 14.3 Situação dos Dados

Análises integradas e avaliações exigem um grande número de informações e parâmetros diferentes para satisfazer às concepções de modelo do ecossistema de paisagem (Tab. 14.1). As informações necessárias encontram-se nos órgãos públicos, são retiradas diretamente de cartas (p. ex., dados de solos) ou são o resultado de algoritmos de interpretação (p. ex., derivações de relevo, dados atuais de informações sobre uso do solo). Especialmente o processamento de grandes territórios, bem como a concepção hierárquica, pressupõe o conhecimento de

Tab. 14.1 Dados de saída e parâmetros a serem derivados para a caracterização do local

USO DO SOLO		SOLOS		RELEVO	CLIMA
					
Imagens do Landsat TM 5&7	Mapas de biótopos Corine	Dados agrícolas/fitonológicos do DWD <sup>1</sup>	MMK <sup>2</sup> BUK200 <sup>3</sup> BUK1000 <sup>4</sup> FSK <sup>5</sup>	MDT - 40 x 40 m - 20 x 20 m - 10 x 10 m	Dados raster e de estações meteorológicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso atual do solo</li> <li>- Separação entre campo agrícola e área verde</li> <li>- Produtos agrícolas atuais, em área</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principais tipos de uso (1989-1992)</li> <li>- Tipos de biótopos Sachsen, 1992</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produtos agrícolas atuais, pontualmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de solo</li> <li>- Formas do solo</li> <li>- Parâmetros químicos e físicos do solo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Derivações simples de relevo, altimetria, declividade, concavidade</li> <li>- Limites de áreas de bacia</li> <li>- Análise do relevo</li> <li>- Regos de drenagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitação, temperatura, evaporação potencial em raster de 1x1 km</li> <li>- Dados agro-meteorológicos pontuais (p. ex., umidade do ar e do solo, radiação global)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Declividade do plantio</li> <li>- Diferenciação de unidades do solo</li> <li>- Derivação de setores de processos</li> </ul>					
CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL					
<sup>1</sup> DWD (abrev.) Serviço Meteorológico Alemão			<sup>4</sup> BUK 1000 (abrev.) Mapa de conjunto de solos a 1:100.000		
<sup>2</sup> MMK - (abrev.) Mapeamento temático agrícola em escala média			<sup>5</sup> FSK (abrev.) Mapeamento florestal detalhado		
<sup>3</sup> BUK 200 - (abrev.) Mapa de conjunto de solos a 1:200.000			Corine = CoORDination of Information on the Environment		

*disponibilidade, qualidade e aplicabilidade específicas de escala* das informações. Para executar essa tarefa, a falta de conjuntos de dados espaciais, disponíveis em escalas unitárias, frequentemente dificulta a satisfação da exigência nas ciências especializadas que, tanto os métodos de pesquisa bem como os dados levantados ou utilizados nas pesquisas, precisam ser adequados ao tamanho da área utilizada (Steinhardt & Volk, 2000).

Os dados disponíveis para o espaço de pesquisa apresentam, no que se refere aos seus limites de informação espacial e de conteúdo, uma grande variação (Fig. 14.2). Porém, mesmo dentro dos planos de informação individuais existem relativamente grandes heterogeneidades. Assim por exemplo, dados de relevo – pelo sistema federal da R. F. da Alemanha – são fornecidos pelos respectivos serviços geodésicos estaduais. Os dados caracterizam-se por diferentes precisões verticais e horizontais. Por isso, a utilização compartilhada dos dados de relevo torna necessária uma “homogeneização” posterior dos dados<sup>1</sup>.

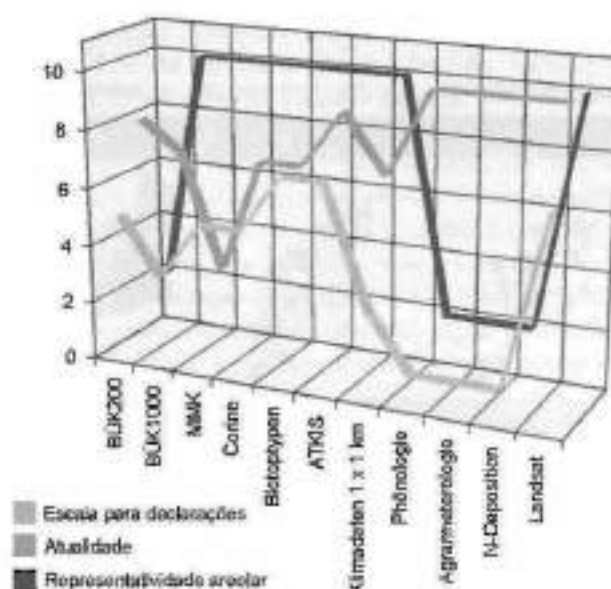


Fig. 14.2 Avaliação dos dados no que se refere aos limites oficiais

Dados de solos estão disponíveis areolarmente só na escala 1:1.000.000 (BÜK 1000), cuja resolução espacial-informativa não é suficiente para muitas questões. O projeto de carta de solos (visão sinóptica) em 1:200.000 (BÜK 200) para toda a área da R.F. da Alemanha não está ainda concluído. Com relação à área agrícola utilizada na antiga R. D. Alemã (Alemanha Oriental), está disponível a cartografia consistente referente ao mapeamento de localização agrícola em escala média (1:100.000) digital, porém o volume de trabalho para o processamento é muito alto.

<sup>1</sup> Assim o módulo ArcInfo Topogrid permite a elaboração de um MDT a partir de dados de entrada de diferente qualidade.

Também é problemática a disponibilidade de informações sobre o uso do solo atual, especialmente no que se refere ao uso do solo agrícola. Para toda a área da R.F. Alemanha estão disponíveis os resultados do levantamento de Corine (*CoOrdination of Information on the Environment*) (*status* 1989-1992, escala 1:100.000). Os principais tipos de uso podem ser daí derivados, porém a diferenciação mais importante, entre área verde e área agrícola, não é possível. O mapeamento dos biótopos em escala 1:10.000 (*status* 1992) bem como os dados do Sistema de Informação Topográfico-Cartográfico Oficial (ATKIS) em 1:10.000 permitem a diferenciação de área agrícola e área verde.

#### 14.4 Concepções para a Derivação de Parâmetros de Localização a Partir do Exemplo da Bacia do Rio Parthe

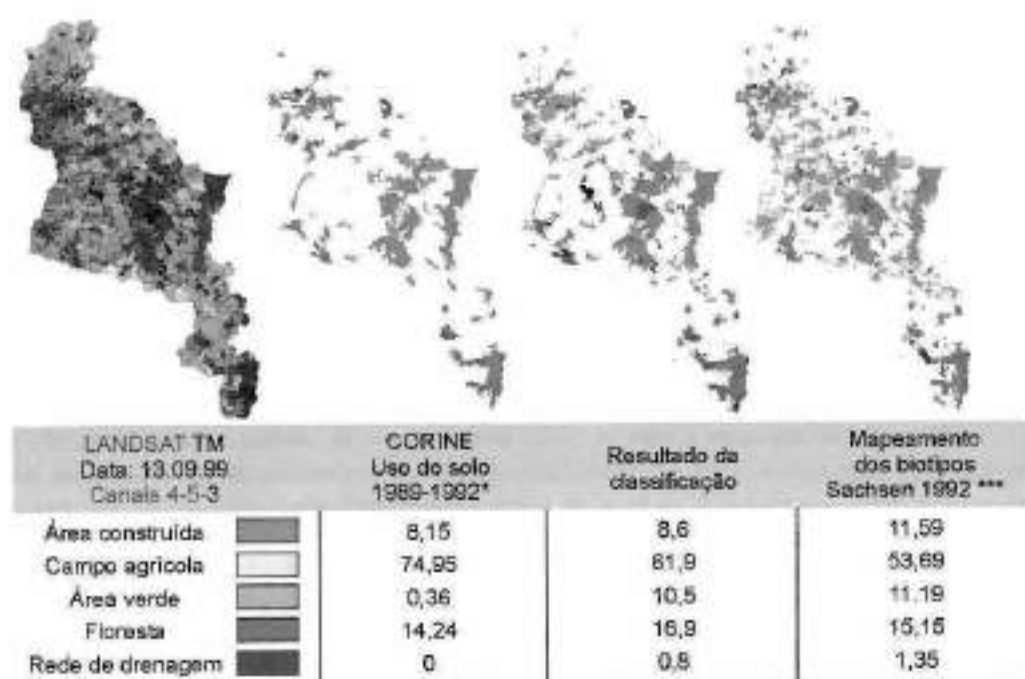
Além das informações temáticas, junto com imagens de satélite e dados altimétricos digitais, estão disponíveis informações aerolares e digitais, que permitem ajustar a derivação aos respectivos questionamentos. A inclusão de informações temáticas na utilização de algoritmos digitais, pode levar a uma melhoria da qualidade da informação dos dados temáticos.

##### 14.4.1 Uso do solo

A partir de dados de sensoriamento remoto (aqui Landsat TM 5/7) pode-se obter o uso do solo histórico e atual. De acordo com o nível de informação desejado, a introdução de dados do projeto Corine, Biótopo ou ATKIS levam a uma melhoria da respectiva qualidade de informação.

A Fig. 14.3 mostra o resultado da classificação de uma imagem de satélite Landsat TM (13.09.99), utilizando dados Corine com o programa eCognition<sup>2</sup>. A vantagem deste programa reside no fato que os dados de entrada espectrais e temáticos considerados, são transformados em objetos por meio de um algoritmo de segmentação, o que corresponde a uma mistura do ponto de vista do conteúdo e espacial. Para cada objeto é construído um conjunto de dados areolares, sobre o qual podem ser utilizados algoritmos de classificação baseados em regras. Neste caso foram estabelecidas funções simples de associação NDVI relacionados aos respectivos grupos Corine (vide Baatz et al., 2000).

O resultado mostra, a partir dos limites de classes, uma representação atualizada dos principais tipos de uso "floresta" e "ocupação humana". A identificação do principal tipo de uso "água" representa uma complementação de conteúdo em comparação com os dados de saída Corine. A interpretação multitemporal permite, além disso, diferenciar entre "campo agrícola" e "área verde", o que corresponde ao nível de detalhamento do mapeamento de tipos de biótopos. Uma discriminação das diferentes culturas (raízes e grãos) é possível por meio de dados adicionais agro-fenológicos. Indicações errôneas do mapeamento Corine nas classes "floresta" "água" e "área verde" podem ser corrigidas. Devido à sua heterogeneidade espectral, a classe "áreas construídas" traz problemas. Aqui é possível considerar adicionalmente os procedimentos baseados em textura (p. ex., Steinnocher, 1997; Mischen et al., 2000). De forma semelhante, pode-se proceder com dados informativos com conteúdo superior (p. ex., mapeamento de biótopos, dados do ATKIS), por meio dos quais podem ser derivadas informações atualizadas e ampliadas de acordo ao grau de informação necessário.



\* Editado por Eurimage GmbH \*\* Serviço Federal de Estatística \*\*\* Serviço de Meio Ambiente e Geologia / Saxônia-Freiberg

Fig. 14.3 Percentual [%] das principais classes de uso do solo Corine, Mapeamento de Biótipos e resultado de classificação na área da bacia do rio Parthe

#### 14.4.2 Solo e relevo

O conjunto do mapeamento MMK ou seja, o mapeamento temático agrícola em escala média foi efetuado no período de 1974 até 1981 em toda a área agrícola da antiga Alemanha Oriental, e "detectou as características de localização relativamente estáveis e que determinavam a produção, seguindo uma metodologia unificada" (Lieberoth, 1982). Na escala de representação 1:100.000, as unidades de cartografia apresentam um tamanho mínimo de 30 ha e tamanho médio de 100 ha. Essas unidades caracterizam, via de regra, recortes heterogêneos da paisagem, na qual "duas ou mais formações de solo ocorrem associadas e formam uma estrutura espacial característica da camada de solo" (Schmidt e Diemann, 1981).

O mapeamento foi efetuado na escala 1:25.000 (mapas de trabalho MMK), a representação foi em mapas coloridos sintéticos, na escala 1:100.000. Os atributos de cada unidade de mapeamento estão registrados nas folhas de documentação A. Estão registrados nessas folhas os critérios condutores como características delimitadoras, bem como os tipos de superfícies topográficas. Os tipos de superfícies referentes ao substrato, hidromorfia e inclinação de vertentes resumem, de forma agregada, importantes características de solos e de locais.

De acordo com a concepção de origem hierárquica, são necessárias informações areolarmente diferenciadas, para permitir a derivação de parâmetros de solos em diferentes níveis hierárquicos. Por isso, nesse projeto analisa-se como derivar por meio de procedimentos de análise de relevos, posições típicas de relevos e relacioná-las com as indicações de localização

das folhas de documentação A do MMK (Fig. 14.4). De modo concomitante, as posições de relevo constituem setores de processos, para os quais há um relacionamento com fluxo lateral de substâncias. Por meio da utilização de dados digitais de relevo com diferentes resoluções geométricas, devem ser derivadas informações válidas para uma determinada escala da análise de relevo.



Fig.14.4 Definição das unidades de mapeamento MMK no inventário de formações de solos

Também na análise de relevo orientada para o solo, procedimentos com base em algoritmos de segmentação já foram utilizados intensamente (Friedrich, 1996, 1998; Möller, 2000). A Fig. 14.5 mostra o resultado do algoritmo de segmentação e classificação, usando o aplicativo eCognition. Os dados de entrada foram a concavidade vertical, declividade, bem como os potenciais talvegues calculados por meio de Topogrid. Após a segmentação, para os setores rebaixados foram calculadas funções de pertinência características da concavidade vertical e da declividade, que foram associadas com os talvegues.

## 14.5 Resumo e Perspectivas

Um objetivo do projeto "Gerenciamento integrado do rio Saale" é a caracterização ampla do posicionamento da área desta bacia hidrográfica e com isto derivar, dentre outros, parâmetros de entrada para modelagens de fluxo de substâncias, permitindo realizar uma avaliação das áreas utilizadas pela agricultura, tendo em vista o uso econômico e racional do solo.

A utilização de procedimentos de segmentação permite uma composição e avaliação em conteúdo e espaço, de dados temáticos, espectrais e de relevo, sendo assim gerados objetos com os respectivos conjuntos de dados areolares. Desta forma, a utilização de algoritmos de



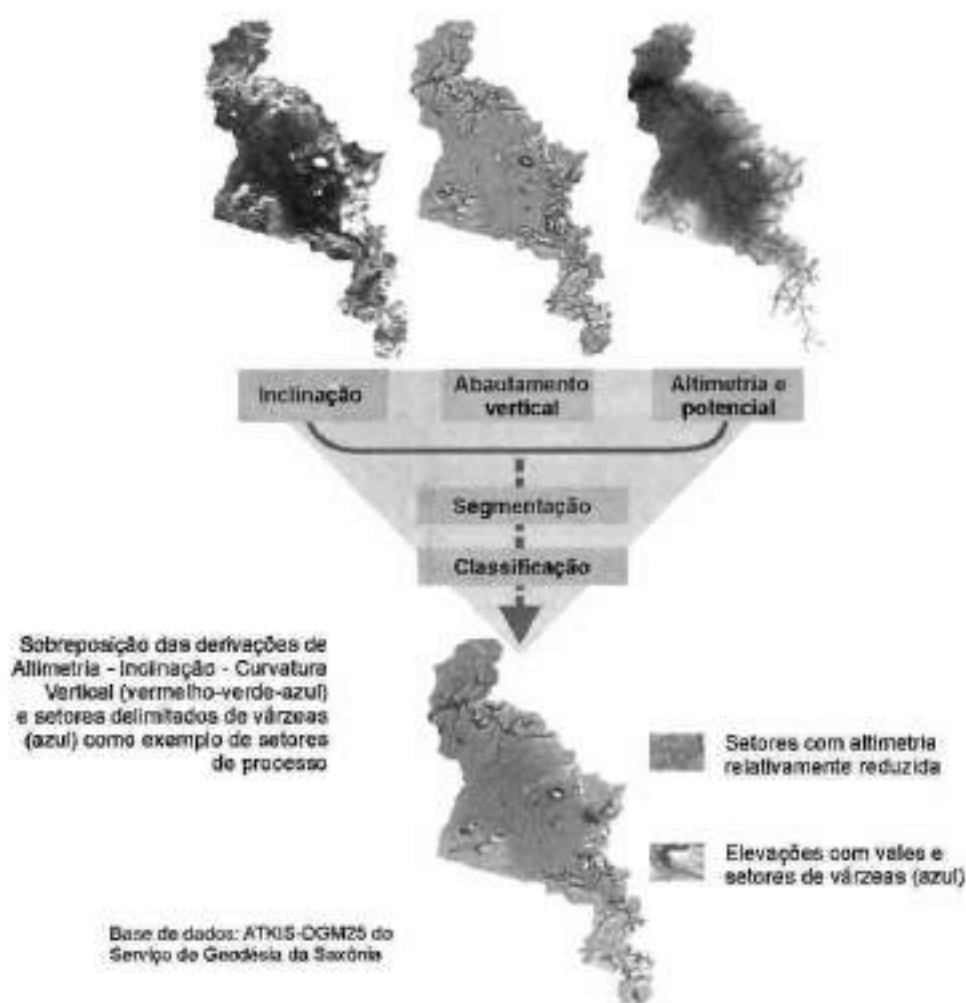


Fig.14.5 Princípios de derivação de processos: exemplo da área da bacia do rio Parthe

classificação, baseados em conhecimento e objeto em conjuntos de dados areolares, resulta em informações temáticas da utilização agrícola anual do solo, que concomitantemente ampliam os conjuntos de dados areolares através da dimensão temporal. Por meio da integração de procedimentos de análise de relevo, é possível derivar afirmações relativas aos objetos, por exemplo, a correlação entre riscos de erosão do solo e a densidade da vegetação.

Com base na inclusão de dados temáticos adicionais, os resultados podem constituir uma substancial melhoria dos parâmetros de entrada para modelos de água e de gerenciamento de substâncias, visto que os parâmetros de informações do solo, relevo e uso do solo são avaliados em seu conjunto. Por meio da análise integrada, também poderão ser ampliados procedimentos de monitoramento do uso do solo. Complementado com a modelagem de fluxos de substâncias ligadas à água e pelo monitoramento de uso do solo apoiado em sensoriamento remoto bem

como com avaliações da estrutura da paisagem, este procedimento pode servir como base para o desenvolvimento de conceitos para sistemas de uso do solo apropriados para determinadas regiões.

#### 14.6 Referências Bibliográficas

- BAATZ, M.; HEYNEN, M.; HOFMANN, P.; LINGENFELDER, I.; MIMLER, M.; SCHÄPE, A.; WEBER, M.; WILLHAUCK, G. *eCognition User Guide*, München, 2000.
- BEHRENDT, H.; KORNMILCH, M.; SCHMOLL, O.; SCHOLZ, G.; OPTIZ, D. Flussgebiets-Differenzierte Nährstoffeinträge im Einzugsgebiet der Saale. In: RODE, M.; HENLE, K.; SCHELLENBERGER, A. (Hrsg.) *Nova Acta Leopoldina*, heft 1, pp. 91-105, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle, 2001.
- GEBHARDT, H. Die Wasserrahmenrichtlinie der EU. In: WASSER; LUFT; BODEN. Heft 1-2, pp. 24-26, 2000.
- FRIEDRICH, K. Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. In: Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D, Heft 21, Frankfurt/Main, 1996.
- FRIEDRICH, K. Multivariate distance methods for Geomorphographic relief classification. In: *Land Information Systems: Developments for planning the sustainable use of land Resources*. EUR17729EN, pp.259-265, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. <http://www.bgr.de/N2/TEXT/conteu.htm>. 1998.
- LEYMANN, G. Die Bedeutung der Wasserrahmenrichtlinie für die Bundesländer. In: *Wasser und Boden*, band 53, Heft 3, pp. 23-33, 2001.
- LIEBEROTH, I. Bodenkunde – Aufbau, Entstehung, Kennzeichnung und Eigenschaften der landwirtschaftlich genutzten Böden der DDR. Berlin, 1982.
- MÖLLER, M. Verfahren der digitalen Reliefanalyse und Satellitenbilddauswertung für die Bodenkartierung des Zielmaßstabes 1:50.000 am Beispiel des Blattes Könnern. In: *PFG*, heft 2, p. 91-105, 2001.
- MÜSCHEN, B.; FLÜGEL, W.-A.; HOCHSCHILD, V.; STEINNOCHER, K., QUIEL, B.; XIE, X. Derivation of Hydrological and Solute Transport Model Parameters by Remote Sensing Methods in the ARSGISP Projekt. In: *PFG*, Heft 5, pp. 319-329, 2000.
- SCHMIDT, R.; DIEMANN, R. *Richtlinie für die mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung*. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Institut für Bodenkunde, Eberswalde, 1981.
- STEINHARDT, U.; VOLK, M. Von der Makropore zum Flusseinzugsgebiet – Hierarchische Ansätze zum Verständnis des landschaftlichen Wasser- und Stoffhaushaltes. In: *Petermann's Geographische Mitteilungen*, Band 144, Heft 2, pp. 80-91, Gotha, 2000.
- STEINNOCHER, K. Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten. In: *Salzburger Geographische Materialien*, Heft 24, pp. 143-152, 1997.
- VOLK, M.; STEINHARDT, U. Integration unterschiedlich erhobener Datenebenen in GIS für landschaftsökologische Bewertungen im mitteleutschen Raum. In: *PFG*, Heft 6, pp. 349-362, 1998.

## Análise de Impermeabilização com Base em Ortofotografias Aéreas Coloridas Digitais Através de Processamento de Imagens Orientadas a Objetos

Hans Pilz e Josef Strobl

### Resumo

Para avaliar as superfícies impermeabilizadas, foram interpretadas ortofotografias aéreas digitais coloridas com resolução geométrica bem elevada, usando o software de processamento de imagens eCognition. A identificação dessas superfícies ocorreu sem informações altimétricas auxiliares. O resultado da classificação foi comparado com dados de controle independentes e submetido a um teste de avaliação de precisão (*accuracy assessment*).

### 15.1 Introdução à Temática de Impermeabilização

A impermeabilização desempenha um papel fundamental com relação ao uso do solo, vazão superficial, renovação d'água em profundidade, microclima local, mas também na drenagem de águas superficiais, e portanto necessita de uma análise especial.

Para escalas maiores de levantamentos, a impermeabilização pode ser entendida como "um isolamento do solo (pedosfera) – mesmo parcial – e eventualmente da rocha dura (litosfera), da atmosfera, hidrosfera e biosfera" (Berlekamp, 1992).

No presente trabalho, o conceito de impermeabilização foi definido pelo município de Rankweil (Áustria) no âmbito de um projeto. Superfícies não impermeabilizadas, ou seja, áreas cobertas por vegetação e superfícies sem vegetação como ruas, estacionamentos etc. e telhados de casas foram discriminados, sendo que os telhados de casas foram identificados separadamente.

O aspecto atual mais importante do cálculo da impermeabilização, está relacionado com a disposição final de esgotos. Já que para o saneamento ou construção de redes de esgotos também deve ser considerada a alimentação com águas pluviais, o conhecimento sobre a eficiência da infiltração superficial é de importância fundamental.

Um outro aspecto que também está fortemente relacionado com a temática de esgotos, é a permeabilidade dos solos. Para tomar as medidas cabíveis, tais como as definidas por lei na Alemanha (Möller, 1999), ou seja, para testar os seus efeitos, os resultados de uma análise de impermeabilização são muito importantes.

Considerando que a classificação no âmbito deste trabalho foi executada com um software que trabalha orientado ao objeto, destacaremos sucintamente as suas vantagens e particularidades.

## 15.2 Análise de Imagens Orientada a Objetos

### 15.2.1 Porque a concepção orientada a objeto?

Até o momento, no processamento de imagens digitais de sensoriamento remoto, foram analisados somente *pixels* individuais. Para tanto, parte-se de uma análise estatística dentro de um espaço de atributos, no qual não se considera a posição espacial dos *pixels*. Assim sendo, nos diferentes procedimentos para classificação, ocorre uma alocação do respectivo *pixel* a uma determinada classe, predominantemente com base no valor do *pixel*.

Em comparação com isso, na interpretação visual é considerada uma resolução dos dados de imagem em amostras espaciais. Aqui o conhecimento especializado do assunto temático por parte da pessoa que está interpretando, tem um papel essencial. Deve-se analisar se pontos da imagem que se encontram em vizinhança espacial possuem uma probabilidade muito maior de pertencerem à mesma classe. Esta condição é pouco considerada nos procedimentos usuais de classificação orientados a *pixels*.

Por isso, nos últimos anos foram feitas tentativas de dividir os dados de sensoriamento remoto em "segmentos", dentro dos quais *pixels* individuais possuem grandes semelhanças entre si.

Especialmente nos dados de sensoriamento remoto de alta resolução e que contém muita textura, os *pixels* individuais apresentam unidades que são pouco informativas. Por meio da formação de segmentos, há uma nítida melhoria da relação sinal/ruído. A classificação de objetos de imagem corresponde também muito melhor à forma visual e cognitiva de aproximação pelo ser humano, podendo-se obter resultados de classificação melhores, por meio da formação intuitiva de classes. Por meio da formação de objetos de imagem também é possível uma integração melhor dos resultados de classificação, num ambiente SIG vetorial. Isso é devido principalmente porque não ocorre o assim chamado efeito "sal e pimenta".

### 15.2.2 eCognition - Análise de imagem orientada a objeto

Neste trabalho, para a classificação dos dados de imagem, foi utilizado o software eCognition da firma Definiens AG, de Munique. No pacote não são classificados *pixels* individualmente, porém *clusters* de *pixels* (objetos), que são juntados em unidades lógicas. A classificação propriamente dita ocorre através de descrições de classe baseadas em conhecimento, as quais são convertidas em álgebra *fuzzy*.

Para poder trabalhar com objetos, o primeiro passo do processamento é a segmentação do material dos dados. Em eCognition utiliza-se a concepção de segmentação com multirresolução.

A segmentação com multirresolução é um procedimento de segmentação patenteado que permite, sem maior conhecimento especializado no que se refere a características selecionadas (p. ex., a cor nas fotografias aéreas), produzir objetos de imagens homogêneas. Dessa forma é possível gerar objetos com diferentes tamanhos e em diferentes planos. Em princípio, a segmentação multirresolução permite segmentar quaisquer dados  *raster*. Também é possível introduzir concomitantemente na segmentação, vários conjuntos de dados  *raster*. Através da possibilidade de gerar vários níveis de segmentação, origina-se uma hierarquia de objetos definida, na qual cada objeto conhece os seus sub e superobjetos. Este fato também pode ser considerado para a classificação.

### 15.2.3 Classificação

A partir de objetos produzidos através da segmentação, pode-se executar com eCognition uma classificação dos conteúdos de imagem. A definição de classes individuais ocorre dentro da "hierarquia de classe". Ela constitui o arcabouço básico, sobre o qual todas as classes são construídas a partir de descrições de classes. A alocação dos objetos a classes individuais ocorre segundo regras que são definidas como funções *fuzzy*. Para a classificação estão disponíveis adicionalmente à informação espectral das imagens, várias dúzias das características (*features*). Trata-se de valores radiométricos derivados do *pixel*, que constituem o respectivo objeto, ou ainda, grandezas relacionadas à geometria do objeto. Mas também a partir da vizinhança do objeto, tanto de dentro da camada (*layer*) do objeto, como também em relação aos outros objetos na hierarquia de objetos, podem se formar regras em álgebra *fuzzy*. Se num projeto temático estiverem disponíveis também dados temáticos, estes igualmente poderão ser utilizados na descrição das classes. A descrição das classes individuais pode incluir muitas regras em relacionamento aleatório. As classes individuais são introduzidas numa hierarquia de classes. Dentro da mesma, é possível por um lado herdar regras de uma classe numa hierarquia superior às classes mais baixas, e por outro lado, agrupar as classes conforme diretrizes semânticas. Assim existe a possibilidade de construir um regulamento de classificação baseado em conhecimento com complexidade a critério do usuário.

(<http://www.definiens.com/guide/functions/5class.htm>)

### 15.3 Da Ortofoto Colorida Digital à Classificação

O primeiro passo de trabalho consiste na transformação dos conjuntos de dados utilizados em dados *raster* com a mesma resolução *raster* e uma extensão espacial exatamente congruente, para poder carregá-los num projeto eCognition.

Por meio da segmentação dos dados, os objetos deverão ser o maior possível e o menor necessário, para que possam ser utilizados racionalmente para o questionamento. Além disso, deve ficar assegurado que o mínimo possível de objetos sejam gerados, os quais se compõem de mais que uma das classes desejadas, para permitir uma classificação que faça sentido. Isso resulta geralmente em tamanhos de objetos um pouco menores do que o necessário para a maioria dos objetos pretendidos.

**Tab. 15.1** Ajustes de segmentação para a segmentação de fotografias aéreas

	Parâmetro de escala	Ponderação de cor / ponderação de forma	Lisura / compactação	Designação/ utilização
Plano 5 (somente <i>layer</i> temático)	0	1,0/0,0	—/—	Parcelas cadastrais
Plano 4	120	1,0/0,0	—/—	Superfícies impermeabilizadas
Plano 3	40	0,8/0,2	0,1/0,9	Vegetação
Plano 2	40	0,8/0,2	0,1/0,9	Telhados
Plano 1	15	0,8/0,2	0,1/0,9	Sombras

No exemplo apresentado foram gerados 5 planos. Na hierarquia dos planos, no nível mais elevado, ocorreu uma segmentação de acordo com os limites cadastrais. No nível 4 foram produzidos objetos que representam de forma otimizada as superfícies de tráfego. O nível 2 contém objetos para a detecção das superfícies do telhado e o nível 3 para as superfícies cobertas por vegetação. Considerando que nas imagens em estudo aproximadamente 15% da superfície encontra-se em setores sombreados, estes foram processados separadamente no nível 1. Visto que o contraste na sombra entre ambas as classes (superfícies impermeabilizadas e não impermeabilizadas) é muito pequeno, foi necessário constituir objetos com homogeneidade muito elevada.

Para a constituição das regras, partiu-se fundamentalmente da informação espectral, já que os valores médios dos canais de fotografias aéreas parecem ser os mais adequados para a classificação. Isto também se justifica porque nenhum modelo digital de terreno estava disponível para identificar as construções. A utilização dos valores médios de todos os três canais de imagem deve garantir uma segurança de classificação maior possível.

A função de pertinência utilizada tem sua atuação maximizada no meio do valor limítrofe mínimo e máximo, e apresenta um forte aumento a partir dos valores limítrofes. Assim garante-se uma elevada probabilidade de pertinência à respectiva classe. A delimitação rigorosa também foi escolhida porque nos diferentes tipos de superfície, na maioria das vezes, se trata de objetos artificiais, que não possuem passagens graduais às áreas vizinhas, na escala utilizada.

Cuidou-se para que não fossem permitidos valores demasiadamente elevados dentro das regras espectrais. Esse procedimento resultou de experimentos efetuados com valores maiores e que levaram a classificações com erros muito maiores. Em virtude da configuração estreita das classes, são necessárias muitas classes parciais para poder detectar superfícies impermeabilizadas, telhados e superfícies não impermeabilizadas.

Devido à já mencionada grande variedade na configuração das superfícies reconhecíveis numa ortofoto, não é possível alocar todas as superfícies a uma classe, somente através da informação espectral. A alocação das superfícies restantes ocorreu de acordo com sua posição na hierarquia de objetos, ou seja, dos seus objetos vizinhos. Para tanto, assumiu-se que objetos espacialmente vizinhos não classificados devem, mantidas determinadas condições, ser alocadas aos objetos vizinhos já classificados. Assim, por exemplo, um telhado de uma chaminé, não obstante se diferencia espectralmente nitidamente da superfície do telhado vizinho, todavia é considerado telhado e classificado como tal. As características de objetos (*object features*) como tamanho, extensão dos limites etc. bem como a sua parametrização, ocorreu com base na análise de objetos não classificados e por meio do teste de plausibilidade da classificação.

A informação cadastral do uso dos lotes também foi utilizada para melhorar o resultado da classificação. Se os limites do lote coincidem muito bem com os da ortofoto e, na maioria dos casos, também com o traçado das ruas, com relação aos prédios existem, em parte, grandes diferenças na representação dos seus perímetros. Igualmente a atualidade da identificação dos prédios deixou a desejar. Por isso, somente com "muito cuidado" esta informação foi introduzida na configuração das regras. Dessa forma cada nível obteve uma classificação com classes definidas principalmente pelo espectro.

No entanto, por meio deste procedimento não puderam ser classificados todos os objetos. Para poder utilizar melhor as relações de vizinhança de objetos classificados e não classificados, esse resultado intermediário foi submetido a uma segmentação baseada na classificação. Permite

uma fusão de objetos vizinhos e classificados para objetos maiores e que façam sentido, sendo que desta forma mudam as características de objetos. Partindo disso, agora os setores da imagem que no nível 1 não foram ainda alocados a uma das três classes esperadas, foram classificados. As regras necessárias para tal, relativamente trabalhosas, são sintonizadas sobretudo com as relações de vizinhança. Entretanto, também características espectrais e temáticas de objetos e características que se relacionam à forma do objeto são abrangidas por essas regras.

Em razão disso, existe também a possibilidade de associar superfícies não classificadas adequadamente à classe apropriada. Assim é possível que, por exemplo, pequenos objetos como parques infantis ou mobiliário em jardim que foram erroneamente classificados como "superfície impermeabilizada", quando estão cercados por superfícies cobertas por vegetação, sejam incluídas em "superfícies não impermeabilizadas".

Para chegar a um resultado que contenha as três classes finais "não impermeabilizado", "impermeabilizado" e "superfícies de telhados", são necessárias várias segmentações baseadas em classificação. Cada nova segmentação baseada em classificação é construída sobre o resultado de classificação anterior, melhorado.

No resultado final da classificação todos os objetos estão alocados a uma das três classes finais pretendidas. Com isso, pôde ser determinado o grau de impermeabilização por parcela, estabelecendo-se regras de classificação que alcançam o percentual de área relativo a superfícies de telhado e de superfícies impermeabilizadas.

São necessários 22 passos de classificação no total para se obter o resultado de classificação e o grau de impermeabilização por parcela.

O resultado da classificação foi exportado com o atributo do número da parcela. Continuou-se o processamento em *ArcView*. O resultado da classificação está disponível em forma vetorial e como balanço, em tabela das classes finais, por lote do cadastro.

#### 15.4 Material de Imagens Utilizado

Para a classificação foram escolhidas fotos aéreas coloridas digitais na escala 1:1.000 do centro da cidade de Rankweil, Áustria. As fotografias aéreas foram tomadas antes do período de rebrota da vegetação, em 08.04.2000, para minimizar o efeito da cobertura por árvores caducifólias, usando uma câmara do tipo Zeiss RMK TOP 30/23 (<http://www.fim.at/orthogem.htm>), na escala 1:5.000. As fotos aéreas foram escaneadas com uma resolução no solo de 10 cm. Para as ortofotos foi utilizado um recorte de 650 x 500 m, de acordo com a Carta Cadastral Austríaca de 1:1.000, do setor central das fotos aéreas. Dessa forma foram minimizadas as distorções devidas à perspectiva central. A precisão da posição das ortofotos no solo é de 35 cm. Para a classificação foram usadas duas folhas cadastrais vizinhas. A folha do mapa, que serviu de base para a elaboração das regras de classificação, foi dividida em duas metades, para reduzir o tempo de cálculo. Para testar a transmissibilidade das regras de classificação também para outros recortes de imagem, o recorte vizinho do mapa cadastral foi classificado com as regras já elaboradas.

#### 15.5 O Resultado Total da Classificação

De acordo com os objetivos do trabalho, já descritos, o resultado final da classificação refere-se à obtenção do grau de impermeabilização.

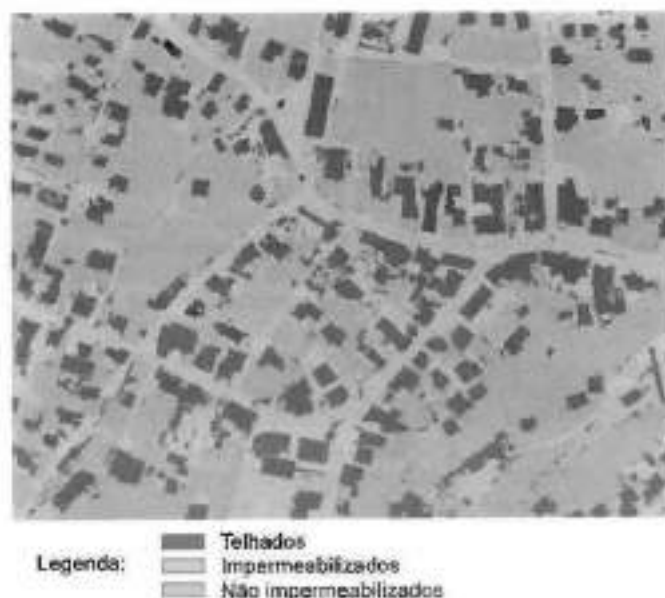


Fig. 15.1 Resultado final da classificação para um recorte do mapa cadastral

No resultado final da classificação, para a área teste total com extensão de 62,5 ha, foram identificados 19% como superfícies de telhados, 25% como superfícies impermeabilizadas e um pouco mais da metade como superfícies não impermeabilizadas.

## 15.6 Avaliação do Resultado da Classificação

Para testar a qualidade do resultado da classificação, foram usados dois procedimentos diferentes. Por um lado, uma metade da folha do mapa cadastral S foi digitalizada e comparada com o resultado da classificação. Por outro lado foi feita uma amostragem da avaliação de precisão (*accuracy assessment*).

### 15.6.1 Comparação classificação e digitalização

Considerando que a identificação separada das superfícies impermeabilizadas e superfícies dos telhados com base espectral somente é possível com limitações, a precisão de classificação geral (*overall accuracy*) também foi calculada sem a sua separação. Este valor então é de 92,67%. Portanto, a precisão de classificação do ponto de vista do usuário do mapa (precisão do usuário) para as superfícies impermeabilizadas junto com as superfícies de telhados perfaz 90,62%, e a precisão do produtor indica que 94,65% das superfícies de referência foram avaliadas corretamente.

Observando-se o desvio percentual da impermeabilização total por parcela, tal como representado na Fig. 15.3, nota-se que das 464 parcelas consideradas, 22% não apresentam nenhum desvio entre o resultado classificado e o digitalizado. Outros 22% apresentam até 3% acima ou seja de 17%  $\pm$  10% a menos em superfície impermeabilizada. Assim, 78% das parcelas encontram-se numa faixa de erro de  $\pm$  10% de impermeabilização total identificada erroneamente.



Os maiores desvios percentuais referem-se a parcelas de poucos metros quadrados, freqüentemente classificadas erroneamente em virtude de sua inclusão em objetos vizinhos.

**Tab. 15.2** Precisão da classificação em comparação com o resultado da digitalização para a metade direita da folha de 5 com três classes finais

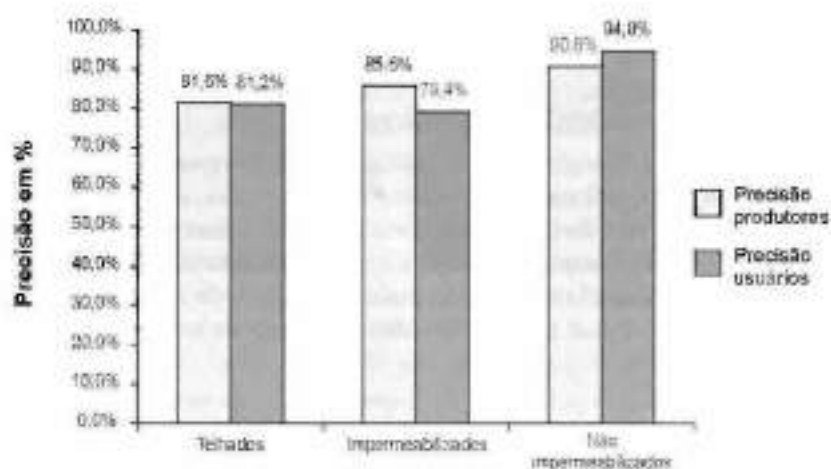
CLASSIFICADOS (em m <sup>2</sup> )	Telhados digitalizado	Impermeabilizado digitalizado	Não impermeab. digitalizado	Totais
Telhados	29.332,12	3.526,26	3.262,01	36.140,39
Impermeab.	4.723,82	34.003,89	4.124,27	42.851,96
Não impermeabilizado	1.871,59	2.171,89	73.214,15	77.257,63
Área total [m <sup>2</sup> ]	35.927,53	39.702,04	80.620,43	156.250,00

Percentual de classificação e erro de comissão				
Telhados	81,16%	9,76%	9,08%	100%
Impermeab.	11,02%	79,35%	9,62%	100%
Não impermeabilizado	2,42%	2,81%	94,76%	100%

Precisões totais					
	Referência totais	Classificados totais	Número correto	Precisão produtores	Precisão usuários
Telhados	35.927,53	36.140,39	29.332,12	81,64%	81,16%
Impermeab.	39.702,04	42.851,96	34.003,89	85,64%	79,35%
Não impermeabilizado	80.620,43	77.257,63	73.214,15	90,81%	94,76%
<b>Total</b>	<b>156.250,00</b>	<b>156.250,00</b>	<b>136.550,16</b>		
Precisão geral da classificação: 87,39%					



**Fig. 15.2** Precisão de produtores e usuários para as classes Telhados, Impermeabilizado e Não impermeabilizado com base no resultado de digitalização



Fig. 15.3 Histograma do desvio percentual da impermeabilização total por parcela

### 15.7 Avaliação de Precisão com Amostras Pontuais

Foi usada para tanto a ferramenta de avaliação de precisão (*accuracy assessment*) de *Erdas Imagine 8.4*. A parametrização da geração de pontos aleatórios ocorreu da seguinte forma:

Cada uma das classes finais devia conter 50 pontos amostrais (Gangkofner, 1996), que no entanto não podiam se encontrar no limite da classe. Isso foi obtido pela determinação da janela de procura do ponto aleatório com  $3 \times 3$  pixels (correspondendo na realidade a  $30 \times 30$  cm) e pela condição que todos os 9 pixels na janela pertençam à mesma classe.

Para a metade direita da folha S, a precisão geral é de 88%. Foram reconhecidas como classificadas erroneamente 18 das 150 amostras aleatórias. Dos pontos para as superfícies não

Tab. 15.3 Avaliação de precisão para a folha S, lado direito

MATRIZ DE ERROS	DADOS DE REFERÊNCIA				
	Classificados	Telhados	Impermeabilizada	Não impermeabilizada	
Telhados		47	2	1	
Impermeabilizada		6	36	8	
Não impermeabilizada		0	1	48	
Coluna total		53	39	56	
Precisões totais					
Nome da classe	Totais de referência	Totais classificados	Número correto	Precisão do produtor	Precisão do usuário
Telhados	53	50	47	88,68%	94,00%
Impermeabilizada	39	50	36	92,31%	72,00%
Não impermeabilizada	56	50	49	84,48%	98,00%
Totais	150	150	132		
Precisão geral de Classificação		88,00%			

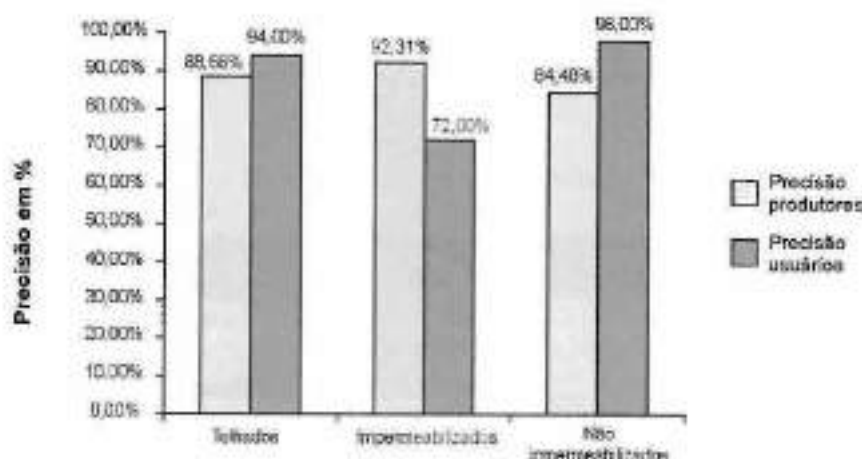


Fig. 15.4 Precisão do produtor e do usuário para as classes Telhados, Impermeabilizada e Não impermeabilizada, com base numa amostra pontual para a folha S, lado direito

impermeabilizadas somente um está errado, sendo que se trata de uma amostra na borda de um caminho de cascalho. A maior cota de erros aqui é das superfícies impermeabilizadas. Seis das quatorze superfícies identificadas erroneamente como impermeabilizadas, são geralmente superfícies de telhado muito claras, e que assim são espectralmente similares a superfícies impermeabilizadas. Nos oito pontos considerados como não impermeabilizados, trata-se de setores nas sombras ou de superfícies sem vegetação, que apresentam solo nu. Nas superfícies de telhados somente foram reconhecidos erroneamente 3 pontos, sendo que 2 deles estão impermeabilizados.

### 15.8 Experiência com a Transposição da Hierarquia da Classificação

Na transposição da classificação a uma outra folha cadastral resulta o problema que podem ocorrer novas formas de configuração de telhados ou de áreas impermeabilizadas. Se estas não puderem se encaixar em nenhuma das classes existentes, pode ocorrer, no caso mais desfavorável, que superfícies inteiras de telhados ou superfícies maiores impermeabilizadas serão classificadas apenas com base na sua vizinhança. Atuar contra isso é possível somente através do controle visual do resultado intermediário da classificação, que é baseado em informações espectrais. Constituindo um setor de imagem maior, não ordenado a uma das três classes finais, seus objetos podem ser alocados manualmente à uma dessas três classes. Resulta disso que a transposição "totalmente automática" de regras, mesmo dentro de um mosaico de ortofotos, pode ser considerada problemática.

### 15.9 Referências Bibliográficas

BERLEKAMP, L.; PRANZAS, N. Erfassung und Bewertung von Bodenversiegelungen unter hydrologisch-stadtplanerischen Aspekten am Beispiel eines Teilraums von Hamburg. Hamburg, 1992.

- MÖLLER, M. Digitale Fernerkundungsdaten als Grundlage von urbanen Informationssystemen. In: EHLERS, M.; J. SCHIEWE. (Hrsg.) Geoinformatik 99: Ausgewählte Themen der Forschungsgruppe GIS/Fernerkundung. Vechta, Materialien Umweltwissenschaften Vechta, Band 5, pp. 55-59, 1999.
- GANGKOFNER, U. Methodische Untersuchungen zur Vor- und Nachbereitung der Maximum Likelihood Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten. München, Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band B24, 1996.

Páginas na Internet:

<http://www.fmm.at>, Status em 03.05.01

<http://www.definiens.com/guide/functions/5class.htm>, Status 04.04.01

## Objetos de Imagem Iniciais como Suporte para a Extração de Objetos de Interesse

Martin Baatz e Matthias Mimier

### Resumo

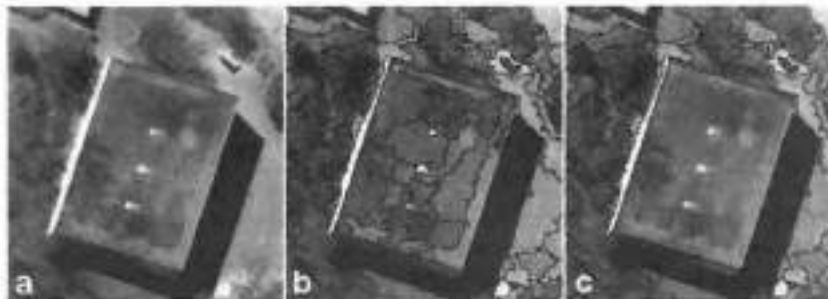
Neste trabalho é apresentada uma nova concepção para a extração de objetos antrópicos a partir de fotografias aéreas (ortofotos), que se baseia no procedimento orientado ao objeto, o software para a análise de imagem eCognition. Objetos de imagem iniciais, que são produzidos por meio do procedimento de segmentação de imagem *Multiresolution Segmentation* (segmentação por multirresolução) são ajuntados por meio de diferentes procedimentos em assim chamados "objetos de interesse", onde a informação como anteriormente disponível por meio de vetorização, desempenha um papel fundamental. As primeiras aplicações demonstraram que esses procedimentos permitem determinar, com precisão, prédios, ruas ou parcelas agrícolas de imagens com alta resolução.

### 16.1 Objetos de Imagem Iniciais e Objetos de Interesse

Em comparação com pontos individuais de imagem, as agregações homogêneas de *pixels* ou objetos de imagem, contêm um grande número de características adicionais, o que os torna excelentes portadores de informações para uma classificação mais avançada da cena, especialmente em dados de imagens de alta resolução. Afora a exclusiva informação espectral, para cada objeto individual podem ser avaliados, adicionalmente, a forma, a textura e atributos do contexto. Essa é a base para a concepção da análise de imagens orientada a objeto, tal como atualmente é executada no sistema de análise de imagens eCognition. Por meio da utilização de um procedimento adequado para produzir objetos de imagens, a resolução (tamanho médio) dos objetos de imagem resultantes pode ser ajustada diretamente aos dados de imagem a serem trabalhados e adaptada à colocação básica do problema. Especialmente em dados de imagens de alta resolução, a razão sinal/ruído é aumentada entre as unidades de informação individuais, o que tem como consequência resultados de classificação mais estáveis. O procedimento da análise de imagens orientada a objeto já comprovou o seu potencial para a ampliação das possibilidades de classificação e de sua aplicabilidade em dados de imagens de alta resolução e com textura, em vários projetos (Baatz e Schäpe, 1999; Bauer e Steinocher, 2000; Hofmann e Reinhardt, 2000).

É desejável, no entanto, por meio da análise de imagem orientada a objeto, não realizar somente e de forma exclusiva classificações de uso e cobertura do solo, porém seguir um passo adiante. Especialmente no processamento de ortofotos com alta resolução, é de grande interesse do usuário obter objetos de imagem que, de modo similar ao resultado da digitalização manual, representem objetos reais como unidades inteiras (objetos de interesse), e que por isso são adequados para a atualização de um SIG.

Na maioria dos casos, os objetos de imagem iniciais são o resultado de uma segmentação de imagem inicial não idêntica com objetos de interesse. A maioria das classes de objetos típicos (p. ex., prédios, ruas, campos etc.) varia bastante em tamanho, cor e heterogeneidade. Os algoritmos de segmentação que seguem um critério de homogeneidade relativamente geral, não estão em condições de simplesmente extrair objetos de interesse, num passo e de modo inequívoco. A sub ou sobsegmentação tem sido a regra. A Fig. 16.1 ilustra esta problemática.



**Fig. 16.1** Comparação do objeto de imagem primitivo e objeto de interesse: (a) casa em fotografia aérea, observe a heterogeneidade do objeto; (b) objeto de imagem primitivo como resultado de segmentação para multirresolução; (c) casa completamente extraída

Simplemente fundir as regiões com igual classificação também não fornece uma solução satisfatória a esse problema, visto que todos os objetos vizinhos seriam fundidos, independentemente de se desejar uma separação de diferentes objetos de interesse, do mesmo tipo. Resumindo, pode-se dizer que, para uma correta extração de objetos antrópicos, são necessários mecanismos mais refinados para a compreensão da imagem e generalização. Se bem que no mundo inteiro são feitas muitas pesquisas nessa direção, ficou demonstrado que o desenvolvimento de soluções representa um grande desafio e que procedimentos operacionais ainda não estão disponíveis.

A seguir apresentamos um estudo de análise para a extração operacional de objetos antrópicos a partir de ortofotos aéreas de alta resolução, onde a informação explícita da forma do objeto de imagem primitivo representa a única base de dados. Este estudo constitui parte de um projeto que tem por objetivo o desenvolvimento de algoritmos mais robustos e eficientes para a extração de objetos.

## 16.2 Concepções e Procedimentos

O motivo pelo qual o olho humano, mesmo em fotografias em branco e preto ou representações em falsa cor reconhece sem problemas casas ou ruas, baseia-se no fato de que, além do conhecimento semântico superior, os objetos antrópicos se caracterizam por bordas retilíneas que formam um contraste especial em relação aos objetos naturais, formados fractalmente. A maioria dos procedimentos, que tem por objetivo a extração de objetos antrópicos, utiliza-se desse fato. Um estudo de Mayer (1999) fornece uma boa visão de conjunto sobre esse campo de pesquisa.

O nosso procedimento se baseia numa segmentação de imagem inicial, mais precisamente numa técnica de sobreposição de regiões (segmentação multirresolução, Baatz e Schäpe, 2000).

Este primeiro passo fornece objetos de imagem iniciais homogêneos, sendo que na avaliação da homogeneidade é utilizada principalmente a informação espectral. A seguir, objetos de imagem iniciais são fundidos, com a exclusiva informação de sua forma, de modo tal que surjam objetos de interesse. Atualmente, este procedimento pode ser subdividido em quatro passos, a saber:

I. Com ajuda da segmentação multirresolução (*multiresolution segmentation*) são produzidos objetos de imagem iniciais. O tamanho médio dos objetos (resolução) é escolhido como o maior possível, porém refinado o suficiente para que os objetos de imagem sejam legítimas quantidades de sub-objetos dos objetos de interesse.

II. Para cada objeto de imagem inicial são extraídas as bordas (vetorização), o que tem como consequência uma concomitante representação em *raster* e polígono do conjunto de dados. Informações de formas explícitas sobre objetos de imagem individuais, bem como a informação sobre pontos de passagem de bordas entre diferentes objetos de imagem ficam disponíveis agora.

III. Para uma fusão adicional são definidos objetos de imagem iniciais como ponto de partida. Isto pode ser efetuado tanto automaticamente como através do usuário.

IV. Objetos de imagem iniciais vizinhos, partes de um objeto de interesse, são fusionados com utilização de suas informações vetoriais. Dependendo da classe do objeto antrópico, diferentes algoritmos são usados.

### 16.2.1 Objetos de imagem iniciais

A produção de objetos de imagem iniciais ocorre com a ajuda do algoritmo de segmentação para multirresolução (Baatz e Schäpe, 2000). Iniciando com objetos de um *pixel*, objetos são fusionados entre si seqüencialmente, sendo que a heterogeneidade resultante é minimizada. Considerando que o algoritmo de objetos de imagem iniciais produz uma resolução definida pelo usuário, um ajuste a questões específicas é facilmente realizado. A Fig. 16.1b mostra um resultado de segmentação típico. Para o observador é possível reconhecer nitidamente que objetos de imagem individuais podem ser discriminados por meio de sua forma. Assim, para objetos de imagem na borda da casa (Fig. 16.1) é possível identificar nitidamente tanto uma componente com cantos retos como uma passagem de canto reto entre dois objetos de imagem vizinhos.

### 16.2.2 Extração da informação de forma (vetorização)

O objetivo da obtenção da forma é calcular, para cada objeto de imagem inicial, uma representação poligonal, com base na qual a forma do objeto possa ser descrita de modo otimizado. Para tanto, é necessária uma certa medida de generalização. Com este objetivo, foi desenvolvida uma variante do algoritmo de segmentação para multirresolução, sendo que desta vez foram fusionados não os *clusters* de *pixels*, porém as bordas de objetos. Outros procedimentos (p. ex., de Stassopoulou et al., 2000) fornecem resultados similares, porém são ineficientes do ponto de vista de tempo de cálculo.

Num primeiro passo, o *raster* de *pixel* ao longo do limite do objeto de imagem é escaneado e produzida uma vetorização, constituída de bordas com comprimentos diferentes porém sempre paralelas ao *raster*. Adicionalmente é considerada a estrutura topológica (isto é, os limites do objeto, Fig. 16.2a).

A seguir, através da análise das periodicidades na estrutura em degraus do *raster* dos *pixels*, as unidades de bordas paralelas ao *raster* são convertidas para bordas ideais e retas. A

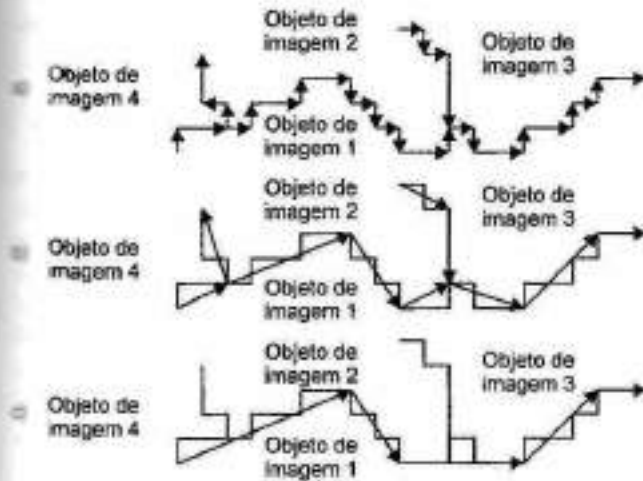


Fig. 16.2 Diversos passos de vetorização: (a) vetores paralelos ao raster; (b) bordas idealmente retas considerando a estrutura topológica; (c) bordas de formas generalizadas sem consideração da estrutura topológica

estrutura topológica também é considerada neste passo, o que significa que não existem bordas que ultrapassem um ponto, no qual três ou mais objetos de imagem se sobreponham (Fig. 16.2b).

Os vetores assim produzidos, no entanto, não são suficientes para uma boa caracterização da forma do objeto de imagem, motivo pelo qual outra abstração precisa ser efetuada (Fig. 16.2c). Isto ocorre pelo resumo em pares de bordas vizinhas com base num critério de homogeneidade (grau de abstração). Aqui a estrutura topológica permanece não considerada, o que significa que também bordas que ultrapassem

um ponto no qual vários objetos de imagem se limitam, podem ser fusionadas. Assim que o valor de heterogeneidade ultrapassar um determinado limiar, a fusão das bordas é interrompida.

Como exemplo típico deste procedimento, partes fractais de uma borda de objeto são caracterizadas por um grande número de bordas curtas, enquanto setores de bordas retas são representados por pequenas bordas compridas. Dessa nova informação resulta um grande número de possibilidades, tanto para uma descrição detalhada e classificação de objetos, como para passos posteriores de processamento. Pode ser derivado um grande número de atributos e de formas a partir da vetorização (p. ex., curvatura, convexidade, grau de retangularidade etc.). A vetorização calculada agora serve, nos próximos passos, como informação básica para produzir objetos de interesse. A Fig. 16.3 mostra, para a cena de um canal, a informação vetorial extraída,



Fig. 16.3 Ortofoto original com linhas de contorno das quais foram extraídos objetos de imagem iniciais. As bordas retas dos prédios e ruas formam um nítido contraste com os objetos naturais



e esclarece a hipótese de trabalho para os próximos passos que afirma que objetos antrópicos, devido às suas bordas retas, formam um contraste com os objetos naturais.

### 16.2.3 Determinação de objetos de saída para a extração de objetos de interesse

Visto que a extração de objetos de interesse se baseia numa fusão de objetos de imagem iniciais, é necessário definir objetos de saída para a fusão. Para tanto são necessárias características únicas, com base nas quais pode ser definido quando um objeto de imagem inicial é parte de um objeto de interesse. Características como o comprimento médio de segmentos de borda por objeto ou o comprimento da borda maior, fornecem freqüentemente indicações inequívocas. Com certeza, para cada borda reta de um objeto de interesse, há também uma borda reta no respectivo objeto vizinho, que não pertence à mesma classe. Ficou demonstrado que é sensato escolher objetos não somente por esta característica, porém efetuar uma seleção prévia sob forma de uma classificação (p. ex.: vegetação, não vegetação, sombra), o que geralmente leva a uma redução significativa do número de objetos a serem tratados.

Qual a classe de um objeto antrópico tratado, freqüentemente pode ser decidido após uma fusão com sucesso ou insucesso de objetos de imagem iniciais. Para tanto, o procedimento contém, para cada classe de objeto, um critério que está em condições de avaliar uma fusão de sucesso. No caso de insucesso da fusão, retorna-se à situação inicial e os objetos correspondentes são marcados como "processados". Além da seleção automática de objetos iniciais, existe naturalmente a possibilidade de uma seleção determinada pelo usuário.

### 16.2.4 Concepções da fusão de objetos de imagem iniciais para objetos de interesse

Atualmente, o desenvolvimento se concentra na obtenção de prédios, ruas e parcelas agrícolas. Dependendo da classe de um objeto antrópico, são aplicados diferentes critérios para a combinação de objetos de imagem iniciais: *ajuste de transição de bordas*, para unidades agrícolas, *ajuste de passagem de bordas paralelas* para ruas e tanto *ajuste de paralelogramo* como o *aumento da retilíneidade de bordas* para a determinação de prédios.

Prédios podem ter formas diferentes. Dependendo da resolução da imagem usada, os prédios às vezes se encontram numa escala em que a detecção de bordas retilíneas é difícil. Por esse motivo foram desenvolvidas duas concepções: para extrair prédios de qualquer forma ou de forma mais ou menos retangular. Enquanto na aplicação do *aumento da retilíneidade* deve haver uma delimitação com bordas retilíneas, o critério do *ajuste do paralelogramo* demonstrou ser mais robusto no caso de retilíneidade menor e em objetos que estão representados numa escala relativamente refinada.

O *ajuste de paralelogramo* é aplicado em objetos com forma retangular, sendo utilizada a representação interna de um padrão de paralelogramo. Inicialmente o padrão é ajustado a um objeto de imagem inicial definido como objeto inicial. Segue-se uma interpretação da fusão do objeto inicial com todos os objetos de imagem iniciais em relação ao seu ajuste à forma ideal, a qual é pré-definida pelo padrão. Um ajuste é bom quando os objetos vizinhos se encontram dentro do padrão, quando ampliam com as suas bordas razoavelmente o padrão (borda *a* na Fig. 16.4) ou quando os objetos fecharem o paralelogramo de modo significativo (borda *b* na Fig. 16.4). A fusão de objetos vizinhos é estendida até que o objeto de imagem fusionada alcançar a melhor aproximação do paralelogramo.

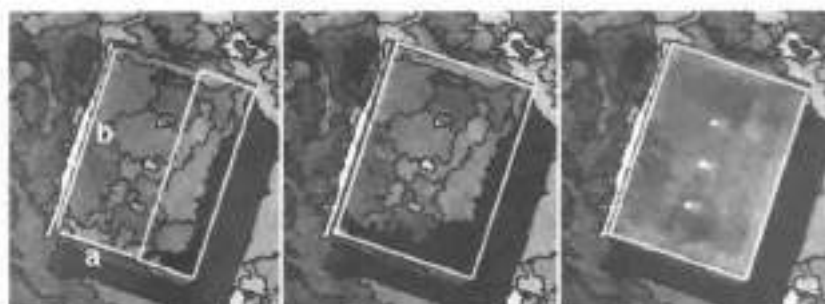


Fig. 16.4 Ajuste do paralelogramo; à esquerda paralelogramo inicial, a borda a aumenta o mesmo sensatamente, a borda b dá um fecho sensato; meio: paralelogramo ampliado; à direita: resultado da fusão com o critério de ajuste de paralelogramo

O critério de *aumento da retilidade de borda* é aplicado quando os objetos a serem extraídos apresentarem um claro desvio da forma retangular. Uma fusão de dois objetos de imagem iniciais, segundo esses critérios, é considerada vantajosa quando o percentual em bordas compridas e longas aumenta significativamente por meio da fusão. Havendo uma delimitação linear contínua, podem ser obtidos objetos de qualquer forma (Fig. 16.5).



Fig. 16.5 Obtenção de objetos com ajuda do critério do aumento da retilidade de borda. Por meio da fusão de objetos, as bordas tortas desaparecem dos objetos de imagem iniciais e a participação das bordas cresce

Da mesma forma, unidades agrícolas (lotes, parcelas) dependem da resolução da imagem, que geralmente são identificadas por limites com percurso linear. A forma, entretanto, é irregular na maioria dos casos. Os melhores resultados para esta classe de objetos são fornecidos por um critério que avalia a transição entre duas bordas (*ajuste de transição de bordas*).

Partindo-se de objetos que se caracterizam por setores com bordas retilíneas, são fusionados objetos vizinhos, caso entre eles houver um ajuste recíproco de setores de bordas paralelas. A Fig. 16.6 esclarece esse critério. Assim que os objetos externos forem fundidos, todos os objetos que se encontram internamente são acrescidos.

Ruas caracterizam-se por seqüências de bordas que têm percurso paralelo a uma distância mais ou menos constante entre si, tal como ilustrado na Fig. 16.7. O critério de extração de ruas foi designado como *ajuste de transição de bordas paralelas*, visto que em adição a uma boa transição de borda (vide Fig. 16.6, à esquerda), deve haver uma segunda seqüência de bordas paralela. Este procedimento também precisa de um objeto de partida, ao qual tenta juntar todos os objetos pertinentes.

Internamente, uma rua é representada como uma faixa abstrata, útil na escolha de um objeto de imagem inicial. Em razão dessa representação interna e do fato de que o algoritmo é utilizado não somente em objetos de imagem iniciais vizinhos, mas que ocorre uma procura a grande distância, é possível juntar as interrupções da rua na imagem (p. ex.,

no caso de árvores que escondem as ruas). Isso funciona especialmente bem quando pelo menos um lado das ruas estiver nitidamente visível, o que constitui um ponto de referência suficientemente forte para uma extração.

### 16.3 Resultados

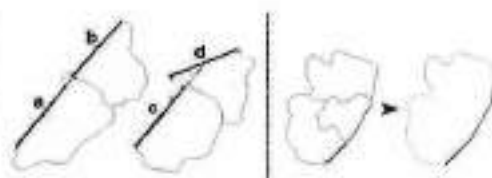
Nas suas primeiras aplicações, os procedimentos relatados já apresentaram resultados muito promissores. Ficou demonstrado que especialmente a operação de objetos de imagem iniciais e a sua vetorização, em comparação com a utilização de iniciais de bordas, que foram produzidos com ajuda de filtros de borda, implicam uma forte redução dos graus de liberdade e conseqüentemente num aumento de eficiência.

A obtenção sensata de objetos antrópicos é possível ou não, por meio de uma segmentação prévia de alta qualidade da imagem, ou seja, em objetos de imagem iniciais, nos quais a informação de bordas também está representada corretamente. Isto pode causar problemas especialmente na detecção de prédios, pois o contraste no lado da sombra de um prédio (ou seja, entre o setor que ainda pertence ao prédio e o setor sombreado) geralmente está totalmente desfocado, o que transparece nos objetos de imagem iniciais também. Por outro lado, o método do *ajuste de paralelogramo* tem ainda muito potencial para manusear também esses setores desfocados.

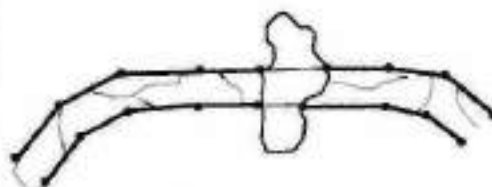
Havendo dados de imagem suficientemente ricos em contraste e com resolução satisfatória, uma extração de prédio funciona de modo robusto tanto com o *ajuste de paralelogramo* como com o *aumento de retilicidade das bordas* (Figs. 16.4 e 16.5).

Em contraste, o reconhecimento de unidades agrícolas é mais simples. Isto é devido ao fato de que o critério de base, o *ajuste da passagem de bordas*, é mais simples do que os critérios que são utilizados para a obtenção de prédios. Por outro lado, a escala sobre a qual as unidades agrícolas estão representadas, em dados de imagem, é bem mais grosseira. Considerando que as parcelas são ajuntadas ao longo de seus limites, podem ocorrer problemas quando um lado de um campo estiver delimitado, num percurso mais longo, por uma fileira de árvores ou objetos similares, visto que neste caso não é possível visualizar uma borda retilínea. Os resultados da extração de uma área de campo são apresentados nas Figs. 16.8a e 16.8b.

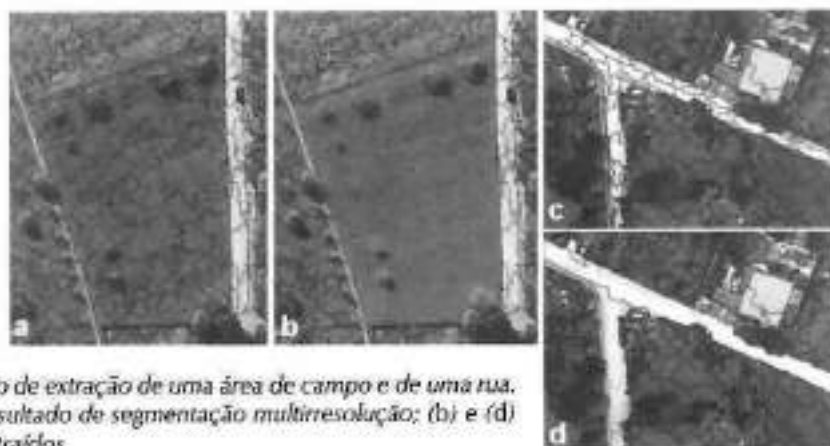
A obtenção de ruas, também com a ajuda da concepção apresentada, fornece resultados muito promissores (Figs. 16.8c e 16.8d). Tem sido extremamente vantajoso colocar uma hipótese clara na base do procedimento, de que uma rua é uma coleção de objetos de imagem iniciais dentro de duas seqüências de percursos paralelos. Assim, é possível generalizar especialmente fatores de perturbação como, por exemplo, árvores que se sobrepõem a ruas, segundo o princípio de "ribbon snake" (cobras em fita).



**Fig. 16.6** Ajuste na passagem das bordas; borda a se ajusta bem a borda b, a borda c, no entanto, não se ajusta a d (esquerda); fusão de três objetos de imagem ao longo de suas bordas que se ajustam bem (direita)



**Fig. 16.7** Transição de bordas paralelas. Uma rua caracteriza-se por duas seqüências de bordas com percurso mais ou menos paralelo. Pela procura de boas transições de bordas na vizinhança mais distante, interrupções podem ser sobrepostas



**Fig. 16.8** Exemplo de extração de uma área de campo e de uma rua. (a) e (c) são o resultado de segmentação multiresolução; (b) e (d) são os objetos extraídos

## 16.4 Perspectivas

Os resultados da extração de objetos antrópicos com base em objetos de imagem iniciais e, somente com base na informação de formas, mostram-se promissores. No entanto, a vetorização dos objetos, de longe, não é a única informação que está disponível. Pode-se aumentar a eficiência se for efetuada uma classificação prévia de objetos de imagem iniciais e se, por outro lado, forem utilizadas outras características como a associação com o contexto ou relações de posição estrutural etc. como critérios adicionais para a fusão de objetos de interesse. Isto ocorrerá na ampliação dos procedimentos mencionados para a sua utilização operacional.

## 16.5 Referências Bibliográficas

- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. GIS – Aktualisierung und Image Fusion basierend auf einem neuen Verfahren zur objektorientierten und multiskalaren Bildanalyse. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T. (Hrsg.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg*, pp. 12-24, Herbert Wichmann, Heidelberg, 1999.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Hrsg.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg*, pp. 12-23, Herbert Wichmann, Heidelberg, 2000.
- BAUER, T.; STEINNOCHER, K. Objektbasierte Auswertung von hochauflösenden Fernerkundungsdaten in urbanen Räumen. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Hrsg.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg*, pp. 30-38, Herbert Wichmann, Heidelberg, 2000.
- HOFMANN, P.; REINHARDT, W. The extraction of GIS features from high resolution imagery using advanced methods based on additional contextual information - first experiences. *IAPRS*, v. 33, Amsterdam, 2000.
- MAYER, H. Automatic object extraction from aerial imagery – a survey focusing on buildings. *Computer Vision and Image Understanding*, 74, pp. 138-149, 1999.
- STASSOPOULOU, A.; CAELLI, T.; RAMIREZ, R. Automatic Extraction of building statistics from digital orthophotos. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 14, n. 8, pp. 795-814, 2000.

## Desenvolvimento de um Procedimento Semi-automático para a Detecção de Novas Áreas de Ocupação Humana, por Meio de Pesquisas Comparativas de Dados de Satélite de Alta Resolução para o Planejamento Urbano e Regional

Johannes Reder

### 17.1 Introdução

As cidades e suas orlas suburbanas são as regiões que se desenvolvem mais rápido e de forma mais dinâmica. As bases documentais de planejamento urbano e regional estão, via de regra, defasadas no tempo, seja em forma analógica (mapas topográficos) seja em forma digital (p. ex., ATKIS) e não estão atualizadas para as aplicações do planejamento. A atualização por meio de levantamentos constantes, exige um esforço razoável do ponto de vista de tempo e custos. Neste trabalho apresentamos e descrevemos uma concepção para a detecção semi-automática de mudanças no uso do solo por meio de dados de satélite. Com base numa concepção metodológica da detecção de mudança da área de controle por vídeo, foi apresentado, avaliado e testado um procedimento em múltiplos estágios da análise de mudança com componentes de textura, imagem diferencial e análise dos principais componentes.

A área de estudos constitui uma parte da cidade de Dresden (Alemanha), com uma superfície de aproximadamente 10 x 10 km com características urbanas e suburbanas. A Fig. 17.1 mostra os dados de imagem pancromática da área de estudo.

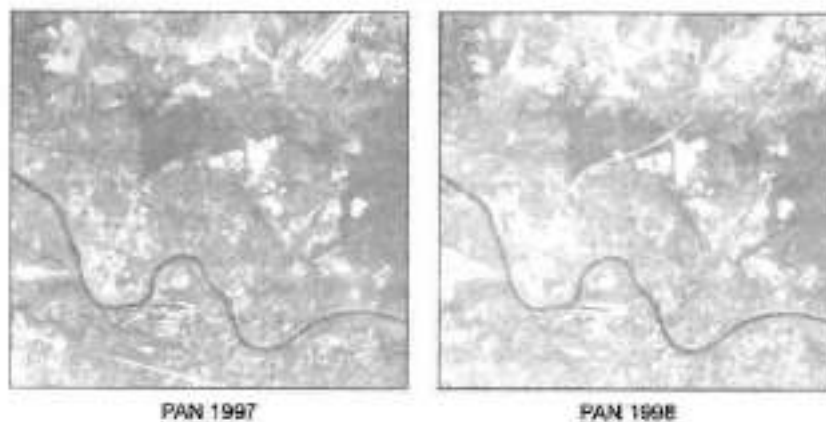


Fig. 17.1 Imagens pancromáticas do IRS da área de estudos, nos anos 1997 e 1998

O enfoque maior do trabalho aqui apresentado está na detecção de áreas que sofreram mudanças, mesmo que a determinação exata do tipo da mudança não é o objetivo deste estudo. São extraídas e realçadas aquelas áreas que sofreram mudanças. A interpretação e a atualização qualitativa de dados de planejamento pode ser efetuada com métodos convencionais de interpretação visual, sendo que a detecção prévia de mudanças permite uma avaliação inicial das áreas a serem pesquisadas mais detalhadamente. Por meio desta seleção prévia das superfícies suspeitas, consegue-se uma forte diminuição do trabalho envolvido, que leva a uma redução de tempo e custos no processo de atualização das bases do planejamento.

Para testar a qualidade do procedimento, é efetuada uma avaliação e análise das superfícies com mudanças estudadas.

Os resultados desse procedimento devem permitir um ajuste rápido e pouco custoso e a atualização das diferentes bases de trabalho para o planejamento de cidades e regiões. Nestas bases de planejamento incluem-se, dentre outros, máscaras de aglomerações humanas (povoados, vilas, bairros etc.), o plano digital regional e o cadastro de ordenação espacial digital. Outras bases de planejamento específicas são, p. ex., o planejamento de uso racional da água. Bases de planejamento atuais são importantes, ao lado do planejamento urbano e regional, para o controle do crescimento (p. ex., grau de saturação da utilização de áreas industriais e de comércio).

### Alvos da detecção de mudanças

A concepção da detecção de mudanças refere-se a estruturas relevantes para o planejamento urbano e regional. Isto significa principalmente mudanças em construções de diferentes formas.

Estas mudanças referem-se por exemplo à abertura de novas áreas à indústria e ao comércio, construção de residências uni ou plurifamiliares, bairros residenciais, construção e ampliação de novas estradas, áreas de estacionamento de veículos, desmatamento, viadutos etc. e são considerados nesse contexto como alvos da detecção de mudanças.

## 17.2 Bases de Dados

O fundamento da pesquisa é constituído de conjuntos de dados multitemporais do IRS – *Indian Remote Sensing Satellite*, o satélite indiano de sensoriamento. Tendo uma resolução geométrica de 5,8 m no modo pancromático e 23,2 m nos canais multiespectrais, esses dados são adequados para representações em escalas até 1:25.000, importantes no planejamento urbano e regional. Para a pesquisa estão disponíveis imagens dos anos 1997 e 1998. Outra base de dados consiste nas fotografias aéreas do Serviço Geodésico da Cidade de Dresden dos anos 1996 e 1999. As imagens do ano de 1999 estão disponíveis como ortofotos, com uma resolução espacial de 1 m e uma precisão de localização de 0,5 m. Outra fonte adicional de dados é o Atlas de Imagens de Satélite da Alemanha (D SAT 2), cujas imagens são de 1997.

A Tab. 17.1 mostra as datas de tomada das imagens dos diferentes sistemas utilizados. Cumpre ressaltar a reduzida resolução radiométrica dos canais do IRS, especialmente a resolução de 6 bits do canal pancromático (7-bit multiespectral). Uma descrição pormenorizada desse sistema encontra-se em <http://www.fas.org/ssp/guide/india/earth/irs.htm>.

Tab. 17.1 *Datas das imagens dos sistemas utilizados*

Sistema imageador	Datas de obtenção das imagens			
	1996	1997	1998	1999
PAN	—	18.08.1997	18.08.1998	—
LISS	—	18.09.1997	18.08.1998	—
Sistemas em câmara	23.06.1998	11.06.1997	—	18.05.1999

### 17.3 Pré-processamento dos Dados

A cena pancromática do ano de 1997 foi georretificada com base em uma ortofoto aérea de 1999 e reamostrada a um tamanho de *pixel* de 5 m. O erro RMS resultante do cálculo é de 0,40 *pixel*, o que corresponde a um desvio de posição < 2,5 m.

Essa imagem constituiu, no decorrer do trabalho, a base de referência para a correção dos outros conjuntos de imagens de satélite. Em todos os casos foi escolhida uma correção com um polinômio de 2º grau para o cálculo. As imagens pancromáticas foram reamostradas a um tamanho de *pixel* de 5 m, e as imagens multiespectrais a 20 m.

Foi necessário cuidado para obter a precisão de localização geométrica exata das cenas entre si, visto que os conjuntos de dados de entrada são canais sintéticos para a detecção estatística de mudanças de dois períodos. A Tab. 17.2 apresenta as respectivas qualidades de correção obtidas.

O último passo do pré-processamento foi fazer uma máscara com os pontos errados no canal pancromático, que ocorreram na cena de 1997, para que as detecções errôneas resultantes destes erros de imagem fossem eliminadas.

Tab. 17.2 *Qualidade da correção dos conjuntos de dados pancromáticos e multiespectrais*

	Qualidade da correção (erro RMS em <i>pixel</i> )	
	1997	1998
PAN	Referência	0,54
LISS	0,59	0,50

### 17.4 Dados de Referência

Usando-se as fotografias ortorretificadas de 1996 e 1999, foi preparada uma referência com relação às superfícies de mudanças. A totalidade das áreas modificadas visualmente perceptíveis foi mapeada, digitalizada e arquivada como polígonos. Esta base de dados foi editada para o espaço de tempo de 1997 a 1999 com ajuda do Atlas de Satélite D SAT-2. Como áreas modificadas a serem cartografadas, os alvos de detecção de mudanças foram registrados. Com base nos novos telhados saneados, estes eram reconhecidos claramente nas fotografias aéreas como áreas modificadas. Foram mapeadas 494 modificações significativas no total, identificadas como alvos que apresentaram mudanças.

A Fig. 17.2 mostra os conjuntos de dados utilizados e a seqüência esquemática no processamento das superfícies de referência. Considerando que para o ano de 1998 não estão disponíveis fotografias aéreas para a área de pesquisa, ocorreram alguns problemas devido aos diferentes períodos dos dados de referência e de pesquisa.

As modificações reais no período de 1996 até 1997 também se observam, em sua maior parte, nas imagens de satélite dos anos 1997 e 1998. Isto é devido, por exemplo, a superfícies sem vegetação, que se encontram em volta de um novo prédio. Essas modificações são reconhecíveis potencialmente e assim é possível uma detecção do passado recente. As modificações que ocorreram efetivamente só no período de 1998 a 1999, não podem ser detectadas de forma alguma com os dados de satélite.

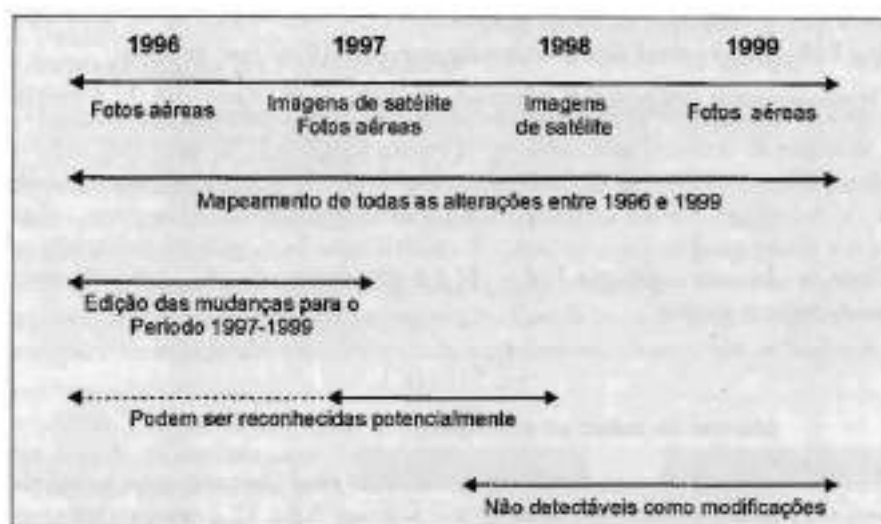


Fig. 17.2 Esquema do estabelecimento da referência e condição de reconhecimento das modificações

### 17.5 Metodologia da Análise de Mudanças

Além das concepções descritas na bibliografia da análise de mudanças, tais como formação de diferenças, procedimentos de valores de limiares, razão entre bandas, transformação de principais componentes, composições coloridas de bandas multitemporais, classificação multitemporal etc. para conjuntos de dados multispectrais e multitemporais também há novas concepções metodológicas como a Detecção de Alteração Multivariada (*MAD – Multivariate Alteration Detection*) (Nielsen et al., 1998).

Por outro lado, a concepção aqui apresentada baseia-se numa abordagem estatística que se originou da área de controle por vídeo (Zillani, 1998). A base de dados da análise de modificações são as imagens pancromáticas do sistema sensor IRS.

O procedimento constitui um sistema de dois níveis. O primeiro nível inclui o cálculo de canais sintéticos como principais componentes, imagens-diferença, razões e imagens de textura que eventualmente podem ser trabalhados com filtros e dobragens. Estes dados servem como



conjuntos de dados de entrada para o segundo nível, no qual, dentro de uma concepção estatística, as superfícies com modificações podem ser calculadas e visualizadas.

Para tanto o ruído de imagem dos conjuntos de dados de entrada é modelado, calcula-se um limiar para cada *pixel* da imagem, sendo que as relações de vizinhança estatísticas dos *pixels* entre si, entram na avaliação. Para poder diferenciar as mudanças nas áreas onde ocorrem, por um lado devido a mudanças de ruído da imagem e por outro lado com base em mudanças reais, são levantadas duas hipóteses:

$H_0$ : na posição da imagem ( $i/j$ ) não ocorre nenhuma mudança, ou seja  $H_1$ : há uma mudança. As coordenadas ( $i/j$ ) representam a posição de cada *pixel* na imagem. Assim pode-se definir o valor de intensidade em cada posição. Segue daí que  $P(d_{[i/j]}/H_0)$  pode ser definida como a probabilidade que  $d_{[i/j]}$  é diferente de zero e que vale a hipótese  $H_0$ . Partindo-se do pressuposto que os conjuntos de dados pesquisados estão constituídos de variáveis aleatórias, tem-se que  $P(d_{[i/j]}/H_0)$  possui uma distribuição normal  $N(0, \sigma)$  com  $\sigma = 2\sigma_c$ .

Detalhadamente esta probabilidade pode ser definida tal como a Eq. 17.1 abaixo:

$$P(d_{[i/j]}/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left\{-\frac{d_{[i/j]}^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (17.1)$$

Deve-se observar aqui que  $P(d_{[i/j]}/H_0)$  é uma função de  $(d_{[i/j]}/\sigma)^2$ . Ao normalizar  $d_{[i/j]}$  considerando  $\sigma$  resulta:

$$P\left(\frac{d_{[i/j]}}{\sigma}/H_0\right)$$

A equação (1) calcula o ruído em cada posição do *pixel*. Para aumentar a confiabilidade da estatística, o próximo passo é considerar uma área maior. A Eq. 17.2 mostra o teste estatístico escolhido, sendo que  $\omega_{[i/j]}^n$  constitui uma janela com comprimento de canto  $n$  e o *pixel* central  $[i/j]$ . Dentro desta concepção o modelo é novamente calculado, tal como  $d_{[i/j]}/\sigma$  na primeira concepção.

$$\bar{\Delta}_{[i/j]}^2 = \sum_{\omega_{[i/j]}^n} \left(\frac{d_{[i/j]}}{\sigma}\right)^2 \quad (17.2)$$

Quando se assume que a hipótese  $H_0$  é verdadeira para todos os *pixels* dentro da janela, uma distribuição conjunta das diferenças dentro da janela  $\omega_{[i/j]}^n$  depende unicamente de

$$\bar{\Delta}_{[i/j]}^2$$

Esta distribuição por sua vez depende de duas variáveis:

1ª:  $d_{[i/j]}$  junto com  $[x/y]$  pertencem às coordenadas de todos os *pixels* que por sua vez pertencem à janela  $\omega_{[i/j]}^n$

2ª: a variância  $\sigma$ , que modela a distribuição do ruído

É possível mostrar que (Eq. 17.3)

$$P(\Delta^2_{[i/j]}/H_0) \quad (17.3)$$

segue uma distribuição  $\chi^2$  com tantos graus de liberdade como o número dos *pixels* dentro da janela. Para definir se um *pixel*  $[i/j]$  muda o seu valor devido ao ruído ou devido a uma real mudança, foi efetuado um teste de significância. Foi determinado um nível de significância  $\alpha$  e calculado um valor de limiar  $\tau$  correspondente.

Para cada *pixel* da imagem  $[i/j]$  foi calculado  $\Delta^2_{[i/j]}$ , quando este *pixel* estiver acima do limiar determinado, ele é marcado como uma mudança real.

## 17.6 Automatização do Procedimento

O estabelecimento de um procedimento semi-automático é realizado com a linguagem de programação SML (*Special Modeller Language*) própria do Erdas Imagine. As etapas de trabalho individuais são automatizadas e introduzidas numa seqüência de procedimentos. Alguns dos passos do trabalho, como a determinação do tamanho das superfícies a serem discriminadas, a escolha do tamanho da janela para os recortes maiores da imagem a serem pesquisados e o limiar de significância, estão dispostos de tal forma que os parâmetros sejam livremente escolhidos, todos os demais passos de trabalho não permitem opções para interferência. O programa foi concebido de tal forma que, com exceção dos dados de entrada mencionados, somente são utilizadas as imagens referenciadas, multitemporais e pancromáticas. Como conjunto de dados de saída, é calculada uma imagem binária que visualiza as superfícies suspeitas em que, com grande probabilidade, ocorreu uma significativa alteração. Todas as seqüências de trabalho são automatizadas. A Fig. 17.3 mostra a seqüência esquemática do procedimento.

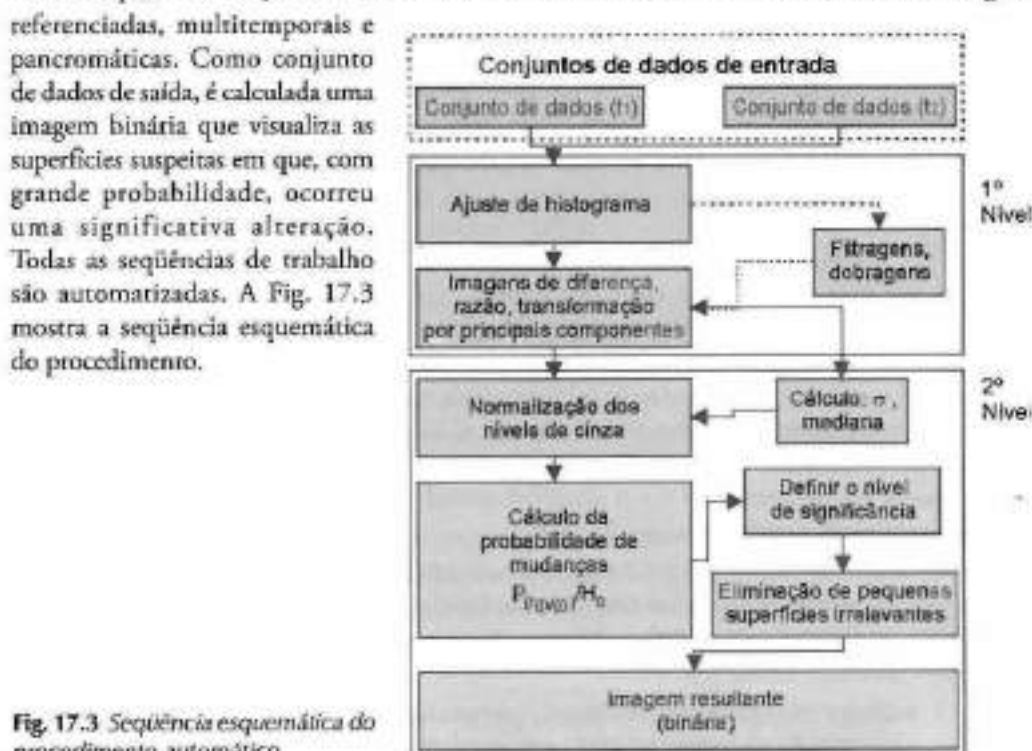


Fig. 17.3 Seqüência esquemática do procedimento automatizado.

### 17.7 Verificação dos Resultados

Para efetuar a verificação dos resultados, as superfícies ressaltadas na imagem binária resultante são sobrepostas à referência obtida visualmente com os polígonos vetoriais. Aqui contam todas as manchas (*patches*) que se encontram nos polígonos de alteração reconhecidos como corretos, enquanto as superfícies que se encontram fora dos polígonos são identificadas como detecções errôneas. O percentual das manchas ordenado corretamente às superfícies de alteração em relação ao número total das superfícies suspeitas detectadas indica a sensibilidade do procedimento. A qualidade do procedimento é calculada pelo número das superfícies de referência corretamente reconhecidas, em relação ao número total das superfícies de referência.

A Fig. 17.4 apresenta um recorte da área de pesquisa. Numa superfície sem construções, foram construídos diversos prédios entre 1996 e 1999. A parte da direita da figura mostra a sobreposição das manchas de mudanças com os polígonos de mudanças.



Fig. 17.4 Construção numa área livre (1996, imagem esquerda) com prédios (1999, imagem central) e sobreposição das manchas de mudanças (cinza escuro) com os polígonos de mudanças (cinza claro)

### 17.8 Primeiros Resultados

Com o programa desenvolvido foram testadas e avaliadas diversas concepções. A Tab. 17.3 mostra diferentes concepções da detecção de alterações e do posterior cálculo com procedimentos estatísticos. Partindo-se de diferentes conjuntos de dados de entrada sintéticos, que foram calculados a partir das imagens pancromáticas referenciadas e com ajuste de histogramas, as concepções mostram resultados bastante diversos. Nos resultados aqui apresentados foi escolhido um nível de significância de 99,5%. O tamanho da janela escolhido para a observação de um recorte maior foi um núcleo de  $3 \times 3$  pixels e somente foram consideradas as superfícies que tinham um tamanho contínuo acima de 10 pixels.

A primeira coluna da Tab. 17.3 mostra o resultado para o cálculo das imagens de textura. As imagens de textura foram calculadas com um núcleo de variação (*variance kernel*) de  $5 \times 5$ , a segunda componente principal dessas imagens foi gerada e utilizada como dado de entrada para o procedimento estatístico.

O resultado deste procedimento mostra por um lado um reconhecimento relativamente bom das superfícies de alteração (82,0%), por outro lado, no entanto, um elevado valor de

**17.3** Estatística de resultados com diferentes concepções da análise de alterações

Concepção metodológica de detecção de mudanças	Nº total de polígonos com mudanças	Nº total de manchas com mudanças	Manchas dentro dos polígonos com mudanças	Manchas fora dos polígonos com mudanças	Nº de polígonos reconhecidos	Nº de polígonos não reconhecidos
Transformação por principais componentes (2º canal) Textura	494	3116	1391 (45%)	1725 (55%)	405 (82,0%)	89 (18%)
Imagem diferença (+1 ±2)	494	2049	1230 (60,0%)	819 (40,0%)	370 (74,9%)	124 (25,1%)
Transformação por principais componentes (2º canal)	494	1818	1179 (64,9%)	639 (35,1%)	409 (82,8%)	85 (17,2%)

detecções errôneas (55,0%). Uma simples imagem de diferença como base de saída já resulta numa forte redução de detecções errôneas (40,0%), contrastando com uma qualidade de reconhecimento efetivo de 74,9%. O melhor resultado advém da segunda componente principal das imagens de saída que tiveram os seus histogramas ajustados. Aqui a qualidade de reconhecimento é de 82,8% das mudanças reais, tendo ocorrido uma taxa de detecção errônea de 35,1%.

Com estes resultados é possível realizar uma grande economia de tempo no que se refere ao apoio numa interpretação visual. Por meio da pré-seleção das superfícies suspeitas, a atenção é focada sobre estas superfícies. Dessa forma, grandes extensões territoriais podem ser eliminadas da classificação visual. Em relação à superfície total, que corresponde a 10.816ha, calculados a partir da 2ª principal componente, somente 511 ha precisam ser colocados no centro da observação. Isto corresponde a aproximadamente 5% da superfície total.

## 17.9 Perspectivas

Os resultados permitem reconhecer tendências iniciais. Assim, a qualidade de reconhecimento alcançada nesses primeiros resultados está acima de 80%, a sensibilidade está a aproximadamente dois terços do total das superfícies suspeitas. Considerando as dificuldades resultantes das diversas janelas temporais da referência e dos dados em estudo (sem possibilidade de detecção das mudanças que ocorreram entre 1998 e 1999), é possível estimar um aumento da qualidade de reconhecimento da ordem de 5-8%.

Estes resultados foram alcançados com os conjuntos de dados da segunda principal componente. Os resultados parecem adequados para o procedimento. Com base nesses resultados, na continuação deste estudo, tanto a qualidade do reconhecimento como a sensibilidade precisam ser aumentadas. Para tanto, pretende-se posteriormente analisar, testar e avaliar procedimentos de filtragem como as dobragens.

Outras questões que precisam ser resolvidas são a otimização do tamanho das áreas a serem filtradas que se encontram na dependência de tamanhos de objetos e da resolução

geométrica, e por outro lado, a otimização do tamanho das janelas para o estudo de recortes maiores de imagem. Um outro ponto é a otimização do valor de limiar de significância. Mudanças que podem ocorrer, cuja causa são diferentes estágios do processamento ou de culturas em áreas agrícolas, são outra fonte de erros que precisa ser eliminada.

Os primeiros resultados foram muito promissores e permitiram concluir que o procedimento oferece a possibilidade de detectar áreas em mudança. Por meio da aplicação de procedimentos estatísticos, a influência do operador é minimizada. Além disso, junto com a concepção estatística associa-se a hipótese que as seqüências automatizadas podem ser transferidas para outros conjuntos de dados bem como para outros sistemas sensores. De modo geral verificou-se que, já a partir desses primeiros resultados, há uma ajuda e portanto uma grande economia de tempo nas interpretações visuais.

### 17.10 Referências Bibliográficas

- JAQUEMAR, J.; KRESSLER, P.; STEINNOCHER, K. Automatisierte Aktualisierung digitaler Nutzungskartierungen auf der Basis von Fernerkundungsdaten. In: *Salzburger Geographische Materialien*, Heft 26, pp. 285-290, Salzburg, 1997.
- LILLESAND, T. N.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. New York/Singapore: John Wiley & Sons, 1994.
- MEINEL, G.; LIPPOLD, R.; NETZBAND, M. The potential use of new high resolution satellite data for urban and regional planning. *GIS between Visions and Applications, LAPRS*, v. 22, part 4, Stuttgart, pp. 275-381, 1998.
- MEINEL, G.; LIPPOLD, R.; WALZ, U. Informationsgehalt neuester hochauflösender Satellitenbilddaten (IRS-1C) und ihre Anwendung in der Raumplanung. In: STROBL; DOLLINGER. (Hrsg). *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann, Heidelberg, pp. 223-230, 1998.
- NIELSEN, A. A.; CONRADSEN, K. *Multivariate Alteration Detection (MAD) in multispectral, bi-temporal image data: a new approach to change detection studies*. IMM Technical Report n. 1997-11, 1997.
- STEINNOCHER, K. Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten. In: *Salzburger Geographische Materialien*, Heft 26, pp. 143-152, Salzburg, 1997.
- ZILIANI, E. *Focus of attention: an image segmentation procedure based on statistical change detection*. Internal Report, LTS 98.02, Lausanne, 1998.

Recursos de Internet:

Informações sobre o sistema IRS: <http://www.fas.org/spp/guide/india/earth/irs.htm>

## Aplicação de Dados Sensores Remotos de Alta Resolução em Zonas Urbanas

Alzir Felipe Buffara Antunes, Jorge Antonio Silva Centeno

### 18.1 Introdução

Nos últimos anos, com o aumento da resolução espacial em imagens e o desenvolvimento de novos sistemas sensores, as aplicações de sensoriamento remoto em ambientes urbanos foram ampliadas. O mapeamento em grandes escalas, tão necessário no planejamento e monitoramento urbano, pode ser efetuado por essas imagens. As imagens isoladamente facilitam a atualização de bases cadastrais e, quando associadas a outras fontes de dados, como mapas temáticos ou dados derivados de levantamentos com a varredura a laser, possibilitam a detecção de novas construções, o monitoramento de alterações em regiões urbanas, estudos de impermeabilização do solo ou o mapeamento de ocupações irregulares, dentre outros. As imagens de alta resolução, como aquelas obtidas pelos sistemas Quickbird e Ikonos, tornam-se cada vez mais necessárias aos gestores urbanos, como suporte para a tomada de decisões técnicas.

Todo o aumento de resolução implica também o aumento da quantidade de informações que podem ser obtidas das imagens. No caso da resolução espacial, a quantidade de detalhes visíveis na imagem aumenta, possibilitando visualizar e identificar objetos que, com resolução espacial mais grosseira, seriam invisíveis. Em áreas urbanas, o aumento da resolução espacial permite identificar elementos como ruas, prédios e até árvores. Para isso, o uso exclusivo da informação espectral, leituras digitais contidas em cada banda, é insuficiente. O incremento da resolução espacial também é responsável pelo aumento da variação espectral dentro de uma classe. Por exemplo, uma parcela de vegetação aparece como uma área espectralmente uniforme numa imagem com *pixel* de 30m. Já em imagens com *pixel* em torno de 1m, a quantidade de tonalidades aumenta devido à presença de sombras e às diferentes condições de iluminação no dossel. Embora tais problemas constituam uma dificuldade para a extração de informações, por outro lado, o aumento da informação espacial permite uma descrição mais detalhada dos objetos e classes de interesse. Com maior detalhe espacial, é possível analisar, por exemplo, a forma, tamanho e orientação, bem como as relações espaciais entre objetos visíveis numa cena.

### 18.2 Análise Espacial-Espectral

O avanço em termos de sensores deve também ser acompanhado por aprimoramentos nos métodos de análise dos dados, o que inclui o processamento da imagem e sua integração com os sistemas de informações geográficas. Métodos, como a segmentação da imagem e a posterior classificação dos segmentos, ganham espaço no contexto das imagens de alta resolução.

Por exemplo, usando-se a segmentação multirresolução *FNEA* (*fractal net evolution approach*) é possível categorizar objetos que possuem relações de contexto em vez de *pixels*.

A segmentação consiste em dividir a imagem em regiões ou segmentos, ou seja, seções da imagem que correspondam aos objetos ou a parte deles. Cada segmento pode então ser descrito tanto em termos espectrais, usando-se os valores médios ou a matriz de variância-covariância entre bandas, como também em termos espaciais, analisando-se a variação de seu contorno ou a distribuição dos *pixels* que o compõem.

O formato *raster* das imagens dificulta a descrição de uma imagem digital em termos espaciais, pois a forma de um segmento é altamente influenciada pelo processo de discretização. Assim mesmo, a inclusão de informação espacial dos segmentos contribui para o aprimoramento da classificação dos objetos presentes na superfície da Terra, principalmente para imagens nas quais há muitos padrões distintos com resposta espectral semelhante. Andrade e Centeno (2003) analisaram a influência da inclusão de diferentes descritores de forma na classificação de imagens Ikonos II, comprovando que parâmetros espaciais, como o índice de compactidade, ajudam a separar classes de objetos espectralmente similares, como telhados e ruas. Nota-se, porém, que os parâmetros de forma são altamente influenciados pelo método de segmentação. A segmentação multirresolução do *FNEA*, por exemplo, controla o crescimento de regiões, utilizando descritores espaciais, como a suavidade dos contornos e a compactidade das regiões. Isso origina segmentos mais uniformes em termos espaciais que, por exemplo, uma segmentação puramente espectral, diminuindo o uso potencial da forma na classificação.

As características espaciais de um objeto não se restringem à sua projeção no plano horizontal. Uma descrição tridimensional da cena, porém, não é possível apenas com uma imagem de sensoriamento remoto. A terceira dimensão pode ser derivada de um par estereoscópico ou, melhor ainda, incluindo dados derivados da varredura a laser aerotransportada (*airborne laser scanner*). Exemplos do uso integrado de dados espectrais e informação altimétrica podem ser encontrados em Miqueles e Centeno (2004), Botelho e Centeno (2005), Karsenty (2005). Estes trabalhos comprovam que os dados se complementam, possibilitando uma melhor descrição de uma cena urbana, onde coexistem objetos com as mesmas características espectrais. Para facilitar a interpretação dos dados altimétricos, uma grade, descrevendo a elevação dos objetos acima do terreno, é geralmente calculada pela diferença entre a grade altimétrica obtida com a varredura a laser e o modelo digital do terreno. Esse conjunto de dados é segmentado, por exemplo, usando-se o segmentador multirresolução. Os segmentos resultantes são então classificados por métodos estatísticos, como a máxima verossimilhança gaussiana, ou por outros métodos, como a classificação com redes neurais artificiais. Na classificação, além da informação espectral, a altura e a forma dos segmentos podem ser incluídas. Os resultados mostrados em Botelho e Centeno (2005) atestam que os dados associados à altura dos objetos melhoraram a qualidade da classificação quando comparada ao resultado da classificação puramente espectral. O uso dos dados altimétricos propiciou, ainda, a obtenção de uma imagem temática com qualidade superior àquela obtida, usando-se apenas informação espectral e de forma, contornando o problema da similaridade das feições espaciais quando se considera apenas o espaço bidimensional.

A plena integração de imagens de alta resolução com outros dados demanda uma correspondência espacial adequada, pois as imagens de alta resolução espacial encontram-se fortemente afetadas pelas distorções introduzidas pela projeção central derivada do processo de aquisição de imagens. A opção mais correta é a geração de uma ortoimagem. Para isso deve ser

usado um modelo digital do terreno detalhado e, neste caso, a informação altimétrica derivada da varredura a laser é muito recomendada. Estudos, como o de Haraki et al. (2005), apontam que modelos geométricos, como a transformação projetiva e o polinômio racional de primeiro grau, podem ser utilizados para esta finalidade. O resultado, porém, apresenta áreas de sombra e oclusão, nas quais a análise da imagem torna-se difícil ou inviável. Em áreas urbanas, onde a presença de edifícios altos é freqüente, os problemas de oclusão ocorrem principalmente ao lado destes edifícios, dificultando a correta análise da imagem.

### 18.3 Classificação do Uso e Ocupação do Solo em Áreas Urbanas

Atualmente há diversas aplicações de sensoriamento remoto, considerando-se os novos sensores de alta resolução disponíveis. Uma revisão abrangente é uma tarefa muito árdua. A seguir, serão descritos apenas alguns exemplos de trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Paraná.

#### 18.3.1 Detecção de construções

O principal interesse em áreas urbanas é a detecção e, se possível, a delimitação dos contornos de construções. Porém a resolução espacial atualmente disponível ainda não permite satisfazer plenamente estas demandas. A estimativa dos contornos, com a acurácia exigida pelo mapeamento urbano, ainda é um problema, mas a detecção de construções é viável. A parte visível de uma construção em imagens orbitais, o telhado, possui dimensões superiores ao tamanho do *pixel* das imagens de alta resolução espacial, o que garante sua detecção. Utilizando-se métodos de segmentação, os *pixels* correspondentes ao telhado ou partes dele podem ser agrupados, formando regiões com contornos regulares. No entanto, como a resolução ainda pode ser considerada grosseira, os limites do telhado não podem ser delineados com a acurácia necessária para, por exemplo, se fazer um mapa cadastral. O uso integrado de imagens de alta resolução e de varredura a laser permite obter uma segmentação melhor, pois bordas de difícil detecção em imagens espectrais podem ser encontradas nos dados altimétricos. Na Fig. 18.1 é mostrado um modelo tridimensional de uma região urbana na cidade de Curitiba. A figura da esquerda (18.1.a) mostra o modelo tridimensional gerado, superpondo-se a imagem aos dados altimétricos da varredura a laser. Usando a segmentação e a classificação de segmentos,



Fig. 18.1 Modelos tridimensionais com textura derivada de imagens Quickbird (a) original; e (b) após a exclusão da vegetação (Miqueles e Centeno, 2004)



as construções puderam ser identificadas, o que permitiu gerar, como é mostrado na Fig. 18.1.b, um modelo tridimensional com apenas as construções, sem a vegetação (Miqueles e Centeno, 2004).

### 18.3.2 Drenagem urbana

A disponibilidade de imagens de alta resolução expandiu o horizonte das aplicações de sensoriamento remoto em áreas urbanas. Por exemplo, em estudos hidrológicos de enchentes urbanas, o mapeamento da distribuição espacial da permeabilidade da cobertura dos solos de uma bacia é um fator muito relevante e dinâmico ao longo do tempo. Manter essa informação atualizada é difícil, e o uso de imagens orbitais é a opção mais atrativa. Porém, imagens com baixa resolução espacial não permitem discriminar os tipos de cobertura no nível desejado para essa finalidade. O interesse, nesse caso, é conhecer a distribuição espacial de áreas cobertas por concreto, asfalto, telhados, grama, solo nu e vegetação densa, para citar os mais importantes. As imagens hoje disponíveis, como as dos satélites Ikonos II, Quickbird e KOMPSAT-2, ainda não têm a resolução espacial adequada para delimitar corretamente objetos com essas

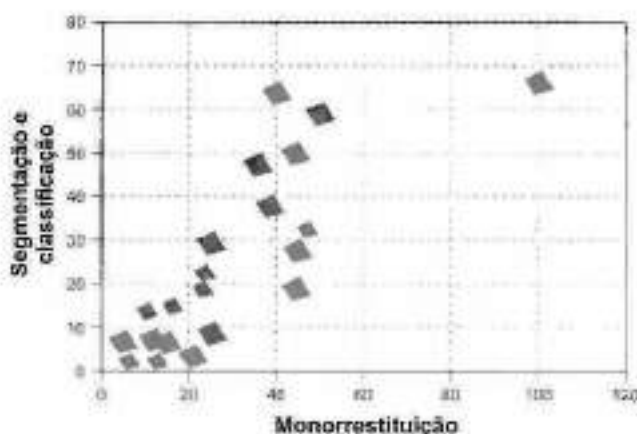


Fig. 18.2 Comparação entre as estimativas de percentagem de áreas permeáveis obtidas por monorrestituição e a classificação de segmentos (Centeno et al., 2003)

área urbana. Esse tipo de informação pode ser utilizado como entrada em modelos hidrológicos de previsão de cheias ou para adotar medidas preventivas.

### 18.3.3 Monitoramento de ocupações irregulares

Se, por um lado, nos bairros centrais de grandes concentrações urbanas, o adensamento populacional resulta na edificação de prédios cada vez mais altos e na diminuição de áreas verdes e permeáveis, nas regiões de periferia e em cidades menores, um problema muito comum é a ocupação irregular de áreas de preservação ou inadequadas para a urbanização, dentro do contexto de um plano diretor. As imagens de alta resolução, neste caso, podem ser utilizadas para produzir a cartografia básica nessas regiões e conformar uma base para a solução de seus problemas.

coberturas, mas a estimativa obtida com elas se aproxima muito da proporção calculada usando-se métodos de restituição fotogramétrica tradicionais, como é mostrado no gráfico da Fig. 18.2 (Centeno et al., 2003). A estimativa torna-se ainda melhor, ao se usarem imagens de alta resolução combinadas com dados altimétricos da varredura a laser, como comprovado por Karsenty (2005). Neste estudo, a classificação orientada ao objeto foi aplicada para discriminar objetos com diferentes graus de permeabilidade, tendo como resultado um mapa temático com a distribuição dessas classes numa

Grande parte dos municípios brasileiros apresenta um elevado déficit habitacional, fazendo com que uma parcela significativa da população de baixa renda ocupe áreas de proteção ambiental ou áreas insalubres. Muitos loteamentos ainda não levam em conta a preservação ambiental, fundamental para o desenvolvimento sustentável. Conseqüentemente, assentamentos urbanos são encontrados em zonas de mananciais de água originalmente previstas como áreas de preservação permanente (APP).

O Município de Paranaguá, situado no litoral do Paraná numa zona estuarina-lagunar, não foge à regra. Na Fig. 18.3, ocupações irregulares ao lado da zona de manguezal podem ser identificadas com ajuda de uma imagem Quickbird. Tendo em vista a relevância social e ambiental, é necessário propor soluções que facilitem o monitoramento e o planejamento da ocupação territorial em regiões próximas às áreas consideradas impróprias ou de preservação, evitando assim um crescimento desordenado, que acarreta riscos à sustentabilidade regional ou à própria saúde e qualidade de vida dos moradores. A metodologia proposta aqui auxilia, de maneira rápida, os gestores e técnicos a avaliar quantitativa e qualitativamente o fenômeno, de modo a possibilitar estudos de intervenção na distribuição da ocupação urbana, podendo, assim, garantir uma melhor ordenação e infra-estrutura básica para as unidades residenciais.

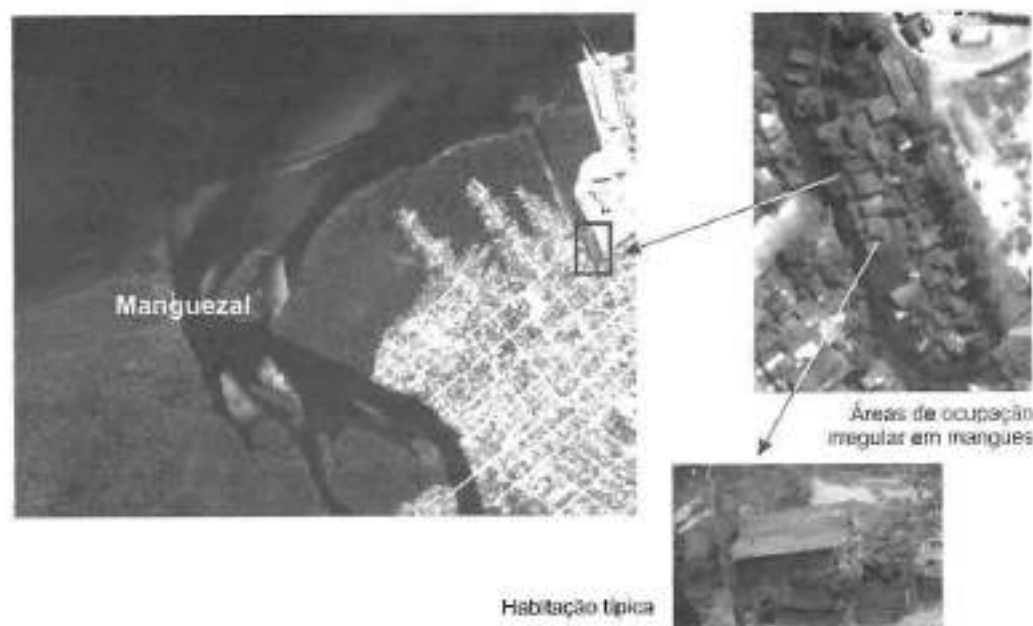


Fig. 18.3 Área de ocupação irregular em imagem Quickbird, Paranaguá-2006 (Fonte: Prefeitura Municipal de Paranaguá)

A percepção humana é alicerçada no conhecimento prévio do espaço e na introspecção do observador. A representação do conhecimento pode ser vista em diferentes escalas de relacionamento. A visão do observador, num primeiro momento, do espaço, é genérica, mas à medida que se observam mais detalhes, a complexidade cognitiva se amplia. Na generalização conceitual, o grau de relacionamento entre as feições depende da escala da observação.

uma consequência direta do grau de detalhe do dado disponível (imagem) e do poder de interpretação e discriminação do observador. No exemplo proposto, o objetivo é mapear as ocupações irregulares numa área em que não são permitidas construções (etapa 1 do fluxograma da Fig. 18.4). A introdução do conhecimento só pode ser efetivada após a segmentação da imagem e a geração de objetos relacionados, de acordo com o que foi sugerido por Blaschke & Strobl (2001). A segmentação, de acordo com a etapa 2 do fluxograma, ocorreu em dois níveis (a) dos subobjetos menores; (b) dos superobjetos maiores, com base nas bandas multiespectrais do satélite Quickbird (modelo híbrido ou fusionado, resolução aproximada de 0,70 m) e informação temática de uso do solo. Os descritores utilizados foram espectrais e houve relacionamento entre objetos. Os descritores foram testados utilizando-se a estrutura hierárquica e o procedimento de especialização da cena (sentido crescente de detalhes, a partir de diferentes níveis).



Fig. 18.4 Fluxograma do método proposto (Adaptado de Antunes, 2003)

A fim de melhorar o desempenho do processo de estratificação temática, adotou-se um número menor possível de descritores, visto que não era objetivo classificar cada moradia, mas, sim, a ocupação como um todo. Os parâmetros de contexto foram fundamentais para a extração da classe *Ocupação Irregular ou Informal* e outras ocupações urbanas. Dessa maneira, foi possível separar classes espectralmente próximas entre si. A possibilidade de modelagem da cena em diferentes escalas simultaneamente (níveis hierárquicos) permitiu uma análise explícita da estrutura contextual dos elementos da cena.

Graças a essa classificação, foi possível quantificar a área ocupada por moradias de baixa renda em zonas insalubres sobre solo lodoso, estando 95% das ocupações impróprias sobre os mangues (Fig. 18.5). Esse estudo preliminar possibilitou ao município uma rápida avaliação da situação desses assentamentos. No caso de Paranaguá, essa área não está atualizada no cadastro técnico da prefeitura, sendo que, posteriormente, esse tipo de classificação pode constar no cadastro multifinalitário.

A metodologia apresentada foi tecnicamente de interesse para a classificação de outros tipos de ocupações do solo, por permitir a inserção de conhecimento, de forma a contribuir para uma interpretação mais coerente da estrutura da cena e da sua representação em diferentes níveis de generalização. Ressalte-se que esse tipo de análise possibilitou avaliar a representação de entidades geográficas em diversos níveis de abstração, a partir de uma simples imagem multiespectral.

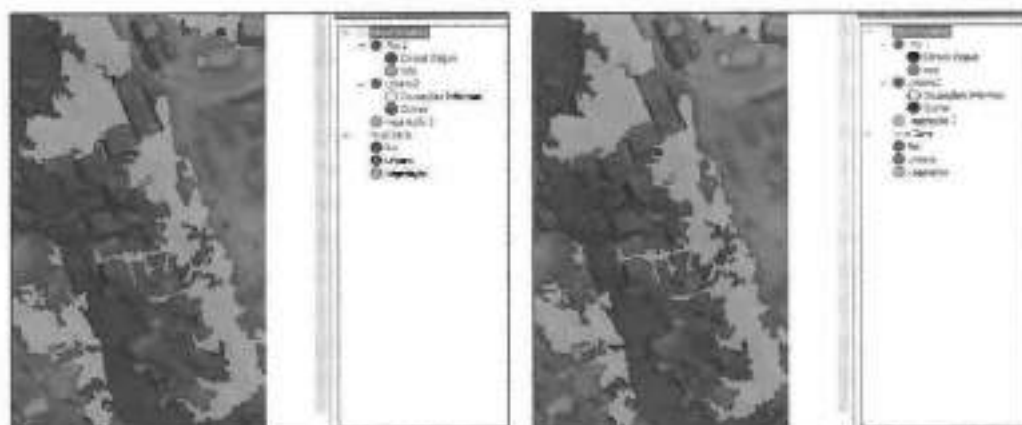


Fig. 18.5. Resultado da classificação hierárquica

Vale ressaltar outra aplicação similar realizada por Sturm (2004), que avaliou a expansão urbana em áreas próximas à Mata Atlântica. Assentamentos urbanos são facilmente encontrados nas áreas originalmente previstas como áreas de preservação permanente (APP), segundo o Código Florestal. A área de estudo é o Município de Matinhos, no litoral do Paraná, situado na área de Floresta Ombrófila Densa, sendo que somente 8% da área de cobertura vegetal é de floresta primária e, conseqüentemente, sua preservação torna-se uma necessidade fundamental. Com uma metodologia análoga à adotada em Paranaguá, gerou-se um mapa temático que mostra uma grande APP ocupada irregularmente. A Fig. 18.6 mostra a faixa de floresta remanescente na área de proteção, computando-se a vegetação contínua e a vegetação alterada.

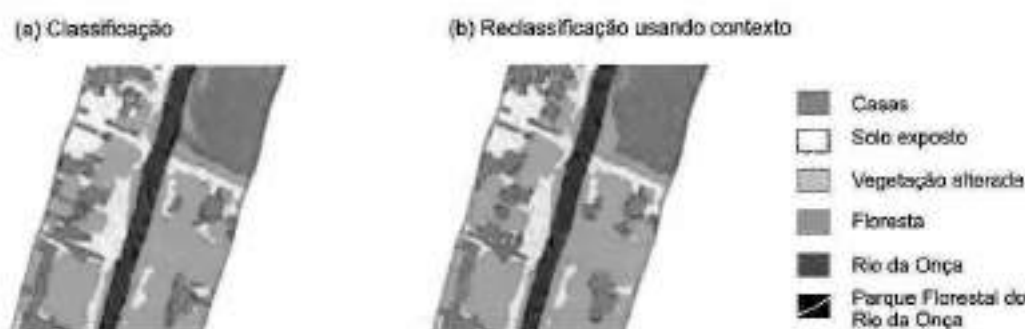


Fig. 18.6. Classificação orientada a objeto em área de preservação permanente, Município de Matinhos - PR (Fonte: Antunes e Sturm, 2005)

#### 18.4 Considerações Finais

Este trabalho permite as seguintes considerações finais:

- A otimização da extração de informações em imagens de alta resolução requer análises que transcendem o nível de *pixel*. Confirma-se o fato recentemente comentado por

muitos autores: a classificação baseada no nível de *pixels*, seja por métodos paramétricos ou não-paramétricos, não permite fazer o amplo uso das potencialidades espectrais e espaciais no âmbito do ambiente urbano.

- A interpretação da imagem segmentada em termos espaciais é tão importante quanto a interpretação de seus dados multiespectrais, uma vez que as propriedades espaciais, tais como forma, tamanho e orientação, são relevantes para a discriminação de classes de objetos com propriedades espectrais similares, muito frequentes em ambientes urbanos. Os objetos da imagem, quando associados aos *pixels* que lhes deram origem, conduzem a uma percepção menos abstrata da cena.

- A segmentação da imagem em diferentes escalas ou níveis é a base para contextualizar superobjetos e subobjetos de maneira a introduzir uma estrutura que permite a inserção da hierarquia. A associação de dados altimétricos de um sistema de varredura a laser (*laser scanner*) é muito promissora na extração de feições urbanas, pois integra, na análise, uma informação nova e complementar à informação espectral contida em imagens multiespectrais.

- O processo de espacialização do ambiente urbano em diferentes níveis hierárquicos deve otimizar a discriminação de um maior número possível de classes num nível mais geral. A quantidade de níveis hierárquicos deve ser proporcional à rede semântica definida *a priori*. Quanto maior o conhecimento sobre o fenômeno geográfico, melhor será o processo de classificação dos objetos.

- Com a disponibilidade de novos sensores com resoluções ainda maiores, novas possibilidades de segmentação devem ser avaliadas, sobretudo aquelas baseadas no espectro morfológico, em que o objeto na imagem é definido como um componente de *pixels* que compartilham da mesma característica morfológica.

Os estudos relatados neste trabalho têm-se mostrado bastantes promissores e factíveis de implementação pelo usuário, pois permitem uma redução de trabalho de campo, melhoram a capacidade de entendimento da dinâmica dos fenômenos urbanos e, por fim, possibilitam a integração efetiva com um Sistema de Informações Geográficas.

## 18.5 Referências Bibliográficas

- ANDRADE, A. E.; CENTENO, J. A. S. Integração de informações espectrais e de forma na classificação de imagens com redes neurais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 9, n. 2, 2003. Disponível em: <<http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/1445/1195>>.
- ANTUNES, A. F. B. Object oriented analysis and semantic network for high resolution image classification. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 9, n. 2, 2003. Disponível em: <[www.ufpr.br/~felipe](http://www.ufpr.br/~felipe)>.
- ANTUNES, A. F. B.; STURM, U. Segmentação orientada a objeto aplicada ao monitoramento de ocupações irregulares em áreas de proteção ambiental. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005. Disponível em: <<http://marie.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbst/2004/11.18.10.03/doc/2019.pdf>>.
- ARAKI, H.; CENTENO, J. A. S.; HUINCA, S.; CAVALHEIRO, A. C. Ortorectificação de imagem *Quickbird* utilizando modelos geométricos dependentes de terreno e modelo de superfície gerado a partir de dados adquiridos por laser scanner. In: KRUEGER, C. P.

- RIBEIRO, S. R. A. (Org.): *As Ciências Geodésicas nas Políticas de Desenvolvimento*. Curitiba: pp. 229-243, 2005. (Série em Ciências Geodésicas)
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation; *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 12-23, 2000. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com/documents/reference2000.htm>>.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS; GIS 6/2001, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com/documents/gis.htm>>. 2001>.
- BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. Uso integrado de imagem de alta resolução espacial e altura derivada do laser scanner na escolha do classificador orientado à região. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 11, n. 1, 2005. Disponível em: <<http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/1546/1296>>.
- CENTENO, J. A. S.; ANTUNES, A. F. B.; TREVIZAN, S. J.; CORREA, F. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. *Revista Brasileira de Cartografia*, Brasil, v. 55, n. 01, pp. 48-56, 2003. Disponível em: <[http://www2.prudente.unesp.br/rbc/2003/55\\_1\\_06.htm](http://www2.prudente.unesp.br/rbc/2003/55_1_06.htm)>.
- KARSENTY, A. Classification orientée à l'objet de la perméabilité des sols en zones urbaines à l'aide d'imagerie de très haute résolution et données Laser Scanner à Curitiba. *XYZ Magazine*. Association Française de Topographie, v. 102, Mars 2005.
- MIQUELES, M. A.; CENTENO, J. A. S. Extraction of buildings in Brazilian urban environments; using high resolution remote sensing imagery and laser scanner data. XXth ISPRS Congress, pp. 12-23, July 2004, Istanbul. Disponível em: <<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/comm4.html>>.
- STURM, U. Nutzungskonflikt bei Uferstreifen in Südostbrasilien erfasst durch objektorientierte Klassifizierung eines Ikonos II-Satellitenbildes. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2003.

## Influência de Diferentes Padrões de Ocupação do Solo Urbano na Qualidade de Mapeamentos de Cobertura do Solo em Imagens de Alta Resolução Espacial: Estudo de Caso São José dos Campos (SP)

Carolina Moutinho Duque de Pinho, Hermann Johann Heinrich Kux e  
Cláudia Maria Almeida

### 19.1 Introdução

Uma das mais recentes fontes de dados para a confecção de mapas de uso e cobertura do solo são as imagens orbitais de sensoriamento remoto. Entretanto, as imagens disponíveis até meados da década de 1990 não possuíam resolução espacial suficiente para discriminar os alvos dentro do ambiente intra-urbano. Dessa forma, estudos detalhados sobre este ambiente só possuíam como fonte de dados de sensoriamento remoto as fotografias aéreas, com alta resolução espacial.

O lançamento de satélites com sensores de alta resolução espacial (Ikonos II, em 1999, e Quickbird, em 2001), representou um momento de grande inovação para o sensoriamento remoto do espaço intra-urbano. Já estavam então disponíveis fontes de informação com alta resolução espacial (as aerofotos), e aquelas com alta resolução temporal (os satélites da série Landsat, com repetitividade nominal de imageamento de 16 dias). Contudo, não havia ainda um tipo de dado que reunisse as duas vantagens em um só produto, como as imagens Ikonos II e Quickbird, com resoluções espaciais entre 0,6 m e 4,0 m, e temporais entre 1,5 e 3 dias.

A utilização desse tipo de imagem impõe novos desafios para a classificação automática de uso e cobertura do solo intra-urbano. As tradicionais classificações *pixel-a-pixel* tornam-se limitadas em imagens que captam detalhes de cenas muito heterogêneas (áreas urbanas) e com grande variação interna das classes (por ex.: classes de tipos de telhados que respondem de forma diferenciada a variações no ângulo de incidência solar e na orientação de suas faces) (Schiewe et al., 2001). Além disso, essas imagens possuem baixa resolução espectral (apenas quatro bandas: azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), o que dificulta a distinção de uma série de alvos urbanos que possuem comportamento semelhante nos comprimentos de onda do visível, como é o caso de ruas pavimentadas com asfalto e edificações com cobertura de antiano escuro.

Portanto, surgiu a necessidade de métodos alternativos que não se limitem apenas a atributos espectrais. Dentre esses métodos, destaca-se a análise orientada a objeto, que permite a inserção de conhecimento do analista e a utilização dos parâmetros de cor, forma, textura e contexto na classificação de imagens.

Há um grande número de trabalhos direcionados à aplicação da análise orientada a objeto em classificações de áreas urbanas utilizando imagens de alta resolução espacial (Hofmann, 2001a; Hofmann, 2001b; Rego, 2003; Centeno e Miqueles, 2004; Pinho et al., 2004; Pinho et al., 2005). Entretanto, pouco se tem discutido sobre a influência dos padrões de ocupação do solo urbano no resultado das classificações.

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência do tipo de padrão de ocupação urbana e, conseqüentemente, o grau de homogeneidade do tamanho, forma, tipos de cobertura e arranjo dos objetos, no resultado da classificação orientada a objeto em áreas intra-urbanas. Para tanto, realizou-se um experimento no qual cinco bairros do Município de São José dos Campos (SP), com padrões de ocupação distintos, foram classificados em termos de classes de cobertura do solo.

## 19.2 Área de Estudo

Parte da área urbana de São José dos Campos foi escolhida para servir de área-teste para este estudo. O município localiza-se no Estado de São Paulo, na região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, entre as duas maiores regiões metropolitanas do Brasil: São Paulo e Rio de Janeiro. Seu território abrange uma área de 1.099,60 km<sup>2</sup>, localizando-se entre as coordenadas W46°06', S23°18' e W45°40' S22°49' (PMSJC, 1994). É considerado um município de porte médio, com população de 539.313 habitantes, dos quais 532.717 (98,78%) residem na área urbana (PMSJC, 2005). A Fig. 19.1 apresenta a área de estudo que compreende os cinco bairros selecionados.

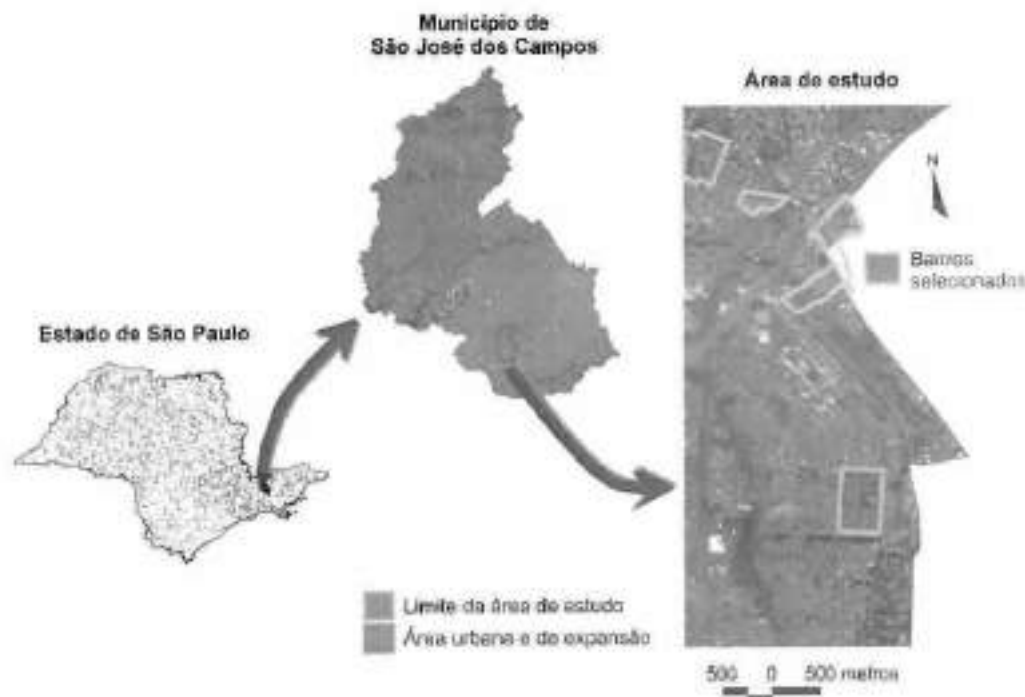


Fig. 19.1 Área de estudo no Município de São José dos Campos – SP



### 19.3 Material Utilizado

Foram utilizados os seguintes dados e programas para a realização deste trabalho:

1) Duas imagens Quickbird; uma pancromática, com 0,60 m de resolução espacial e outra, multispectral, com 2,40 m de resolução e quatro bandas (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). As imagens são do tipo *ORStandard2A*, obtidas em 17-5-2004, com ângulo *off-nadir* de 7,0° e resolução radiométrica de 16 bits (embora os *pixels* só estejam distribuídos ao longo de apenas 11 bits).

2) Banco de Dados Cidade Viva (PMSJC, 2003), utilizado para a caracterização da área de estudo e para a extração das bases digitais de bairros e quadras utilizadas no trabalho.

#### 19.3.1 Programas utilizados

1) Spring 4.1: Para a visualização do banco de dados Cidade Viva (PMSJC, 2003), e exportação dos planos de informações vetoriais: bairros e quadras,

2) Envi 4.0: Para a realização das etapas de pré-processamento e transformações sobre as imagens.

3) e-Cognition 4.1: Para a classificação de imagens orientada a objeto.

### 19.4 Desenvolvimento do Experimento

O desenvolvimento deste trabalho foi efetuado nas seguintes etapas: seleção da área de estudo; preparação das imagens; definição e caracterização das classes; segmentação; classificação; avaliação da classificação.

#### 19.4.1 Seleção da área de estudo

A seleção dos bairros foi conduzida de forma a contemplar diferentes tipos de padrões de ocupação urbana e conseqüentemente, de graus de homogeneidade, de tamanho, forma, tipos de cobertura e arranjo dos objetos. Foram selecionados os bairros Jardim Renata, Cidade Jardim, Jardim Apolo, Vila Acácias e Vila Letônia (Fig. 19.2).

Esses bairros foram divididos em dois grupos distintos: bairros com arranjo espacial bem definido e com arranjo espacial mal definido. No primeiro grupo, encontram-se Jardim Renata, Cidade



Fig. 19.2 Bairros selecionados, segundo o tipo de arranjo espacial

Jardim e Jardim Apolo, bairros que se caracterizam por construções com materiais de cobertura e tamanhos homogêneos, organizados de forma uniforme em suas áreas. Já o segundo grupo se caracteriza por construções de tamanhos distintos e com grande variação de materiais de cobertura. Além disso, não há um padrão único de organização das edificações.

#### 19.4.2 Preparação das imagens

Foram realizados dois processos de transformação sobre as imagens: fusão por principais componentes e transformação IHS a partir de uma composição colorida com cor verdadeira. O objetivo da fusão foi viabilizar uma melhor identificação dos alvos urbanos por meio de uma imagem sintética, que reúne a informação espectral da imagem multiespectral com a alta resolução espacial da imagem pancromática. Já a transformação IHS foi utilizada para ampliar a gama de atributos possíveis de serem utilizados durante a classificação. Partindo-se do princípio de que a informação espectral básica contida neste tipo de imagem é a cor (os dados possuem apenas três bandas no visível e uma no infravermelho próximo) e muitos alvos urbanos possuem cores muito similares, a utilização das informações de brilho, saturação e matiz dos objetos podem auxiliar na distinção destes.

#### 19.4.3 Definição e caracterização das classes de interesse

A seleção e caracterização das classes de interesse foi realizada com base na interpretação visual da imagem Quickbird fusionada, procurando identificar os principais materiais aplicados nas vias pavimentadas, nas coberturas das construções e também os principais tipos de cobertura de feições naturais. Foram definidas as seguintes classes: Vegetação Arbórea, Vegetação Rasteira, Objetos de Alto Brilho, Cobertura Metálica, Concreto/Amianto Escuro, Concreto/Amianto Médio, Asfalto, Cerâmica Clara, Cerâmica Escura, Solo Claro, Solo Escuro, Piscina e Sombra.

A caracterização das classes foi auxiliada pela elaboração de chaves de interpretação para cada uma das classes. Nestas chaves, foram analisados os elementos de interpretação: cor, tamanho, forma, localização e textura.

#### 19.4.4 Segmentação

Após uma primeira inspeção visual sobre as imagens, concluiu-se que nos bairros Jardim Renara, Cidade Jardim e Jardim Apolo há certa homogeneidade de tamanho dos objetos a serem extraídos (tipos de cobertura das edificações). Entretanto, existem algumas classes de objetos menores que só podem ser detectados em um nível mais fino de detalhes (Objetos de Alto Brilho, Piscinas, pequenas sombras e detalhes da superclasse Vegetação). Como não seria possível identificar esses dois grupos de objetos em um mesmo nível de segmentação, optou-se por trabalhar com dois níveis: Nível I, objetos pequenos, e Nível II, objetos de interesse. Após uma primeira classificação desses dois níveis, os objetos do Nível I foram agregados ao Nível II em uma operação de segmentação que produz como que "furos", por assim dizer, nos objetos de um determinado nível hierárquico, a partir da junção com objetos de um nível inferior. Além dos dois níveis mencionados, também foi criado o Nível III, o mais grosseiro de todos, no qual foram delimitadas as quadras. Esse último nível foi utilizado como restrição espacial para as classes Concreto/Amianto Escuro e Asfalto.

Nos outros dois bairros, foram adotados apenas dois níveis de segmentação: um para as quadras e ruas (Nível II) e outro para as classes de cobertura do solo (Nível I). Isso porque não havia um tamanho médio de objetos-padrão, o que dificultou o tipo de operação realizada com o outro grupo de bairros.

Cabe ainda ressaltar que, em cada uma das imagens dos bairros, foram aplicados parâmetros de segmentação diferentes, selecionados com base em testes.

#### 19.4.5 Classificação

Para a classificação de cobertura do solo dos bairros, foram elaboradas redes semânticas específicas para cada um deles. Em cada uma dessas redes, foram selecionados descritores e modeladas funções de pertinência *fuzzy* adequadas às especificidades de cada um dos bairros.

As treze classes de cobertura do solo definidas na Seção 19.4.2 só foram identificadas no bairro Vila Acácias; para os demais bairros, nem todas as classes estavam presentes. Este fato resultou em uma rede semântica mais complexa para o bairro Vila Acácias e em redes com estruturas mais simplificadas para os demais bairros estudados. Nas Fig. 19.3 e 19.4, observam-se, respectivamente, as redes para o bairro Vila Acácias e para o bairro Cidade Jardim. Comparando-se ambas as redes, observa-se claramente a diferença entre a complexidade destas.

No final de todas as classificações, as classes Cerâmica Escura e Clara foram agrupadas em uma única classe, Cerâmica, e Solo Claro e Escuro foram reunidas na classe Solo Exposto. Dessa forma, totalizaram-se no final onze classes de cobertura do solo.

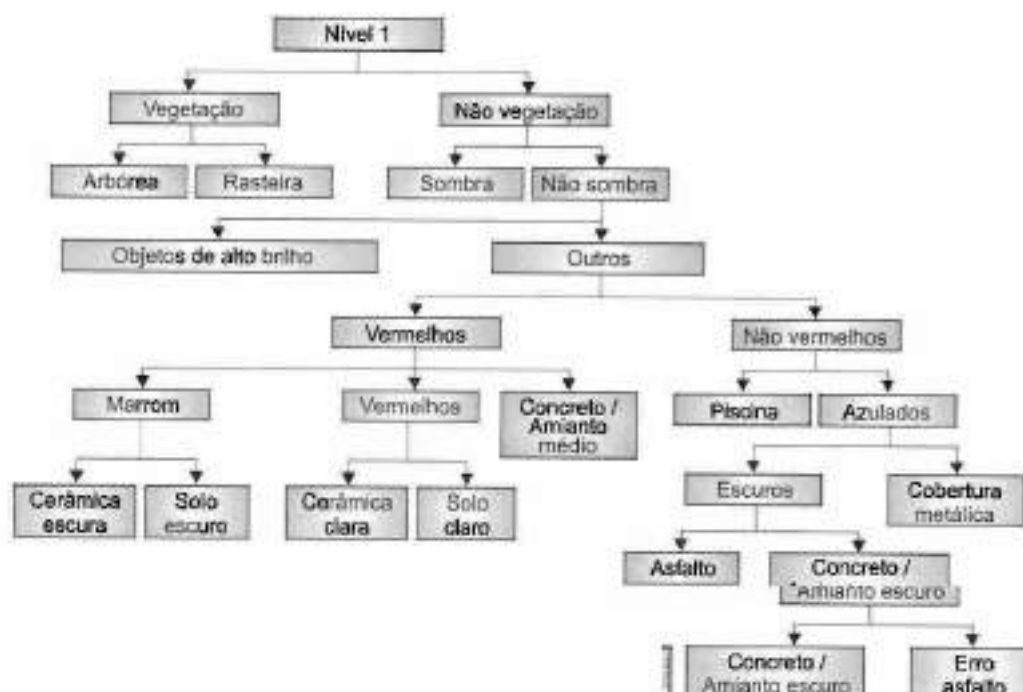


Fig. 19.3 Rede do bairro Vila Acácias



Fig. 19.4 Rede do bairro Jardim Apolo

Após a elaboração da rede, da seleção de descritores e da elaboração das regras de pertinência *fuzzy*, foram realizadas as classificações de cada bairro e comparados os seus resultados.

#### 19.4.6 Avaliação dos resultados

Nesta etapa, foi elaborada a matriz de confusão e calculado o coeficiente *Kappa* para cada uma das classificações. Os resultados das classificações foram então categorizados segundo a escala proposta por Landis e Koch (1977), exposta na Tab. 19.1.

#### 19.5 Resultados e Discussões

Analisando-se os valores do coeficiente *Kappa* para cada um dos bairros (Tab. 19.2), observa-se que os bairros Jardim Renata, Cidade Jardim e Jardim Apolo produziram classificações com resultados muito bons, segundo a escala de Landis e Koch (1977). Já Vila Acácias e Vila Letônia, com valores comparativamente inferiores, são categorizadas apenas como classificações boas.

Tab. 19.1 Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa

Valor do Kappa	Qualidade da classificação
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

Tab. 19.2 Coeficiente Kappa, segundo os bairros em análise

Bairro	Kappa
Jardim Renata	0,759
Cidade Jardim	0,737
Jardim Apolo	0,636
Vila Acácias	0,582
Vila Letônia	0,502

### 19.5.1 Jardim Renata

O bairro Jardim Renata é predominantemente residencial, com ruas pavimentadas e pouco arborizadas. As edificações são horizontais, com cobertura de telha cerâmica (aparentemente com o mesmo nível de conservação); apresentam certa homogeneidade quanto aos atributos de tamanho (100 a 150 m<sup>2</sup>) e forma (retangular), conforme se observa na Fig. 19.5.

Este bairro apresentou os melhores resultados para a classificação, com coeficiente *Kappa* de 0,759, o que a qualifica como muito boa (Landis e Koch, 1977). Esse resultado deve-se a três fatores: o primeiro refere-se à geometria da cena, onde os objetos possuem homogeneidade quanto à forma, tamanho e padrão de localização, facilitando a delimitação dos objetos na fase de segmentação.

O segundo relaciona-se ao fato de não haver estacionamentos pavimentados no bairro, o que permitiu a criação de um descritor bem simples para a classe Asfalto, referindo-se aos objetos escuros que pertencem ao superobjeto Ruas. Esse descritor diminuiu bastante a confusão entre Asfalto e Concreto/Amianto Escuro. O terceiro relaciona-se à ausência da classe Solo Exposto, que, muitas vezes, confunde-se com a classe Cerâmica ou com Vegetação Rasteira (Pinho, 2005).

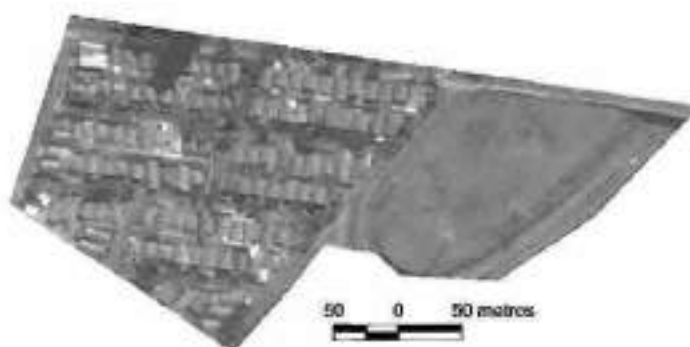


Fig. 19.5 Imagem do bairro Jardim Renata

No Jardim Renata, foram identificadas apenas

oito classes: Objetos de Alto Brilho, Cerâmica, Concreto/Amianto Médio, Concreto/Amianto Escuro, Asfalto, Sombra, Vegetação Arbórea e Vegetação Rasteira.

### 19.5.2 Cidade Jardim

O bairro Cidade Jardim possui ruas pavimentadas e arborizadas. As construções são horizontais, com homogeneidade de tamanho (variando de 200 a 250m<sup>2</sup>) e material de cobertura. Na seção norte da imagem, basicamente todos os telhados são de Concreto/Amianto Escuro; já no setor sul, o material que prevalece é a telha cerâmica. O que chama mais atenção neste bairro é o arranjo das edificações (reduzido afastamento lateral e distribuição retangular das construções) e a regularidade de forma, tamanho e material de cobertura das edificações (Fig. 19.6).

O bairro Cidade Jardim foi o que obteve a segunda maior exatidão temática, com *Kappa* de 0,737, o que também a qualifica como muito boa. Ao contrário do bairro anterior, que possui apenas oito classes de cobertura do solo, Cidade Jardim possui todas as onze classes definidas para o experimento. Assim, o bom resultado alcançado pela classificação é devido ao padrão dos objetos da cena, que possuem tamanho e forma homogêneos, além de estarem organizados



segundo um arranjo espacial bem-definido. Em outras palavras, essas características permitiram uma segmentação eficiente dos objetos, a qual influenciou no bom resultado da classificação.

Benz et al. (2003) e Schiewe (2002) também observaram em seus trabalhos que bons resultados na classificação dependem de uma boa segmentação, que reconheça os limites dos objetos de interesse de modo coerente com os objetos no mundo real.

Fig. 19.6 Imagem do bairro Cidade Jardim

### 19.5.3 Jardim Apolo

Jardim Apolo é um bairro residencial de alto padrão, com ruas pavimentadas e bem arborizadas, edificações horizontais e com cobertura predominantemente de telha cerâmica (com idades distintas refletidas por cores diferenciadas) e a presença de jardins e piscina em praticamente todas as residências (Fig. 19.7).

Na sequência dos bairros, o Jardim Apolo foi o terceiro na exatidão temática, com *Kappa* 0,635. Dessa forma, a classificação deste bairro também é categorizada como muito boa (*Kappa* entre 0,60 e 0,80).

Neste bairro, foram identificadas nove classes. As classes Cobertura Metálica e Solo Exposto não estavam presentes. Assim como no bairro Jardim Renata, as ausências da classe Solo Exposto e de estacionamentos pavimentados com Asfalto contribuíram para a obtenção de um bom resultado na classificação.

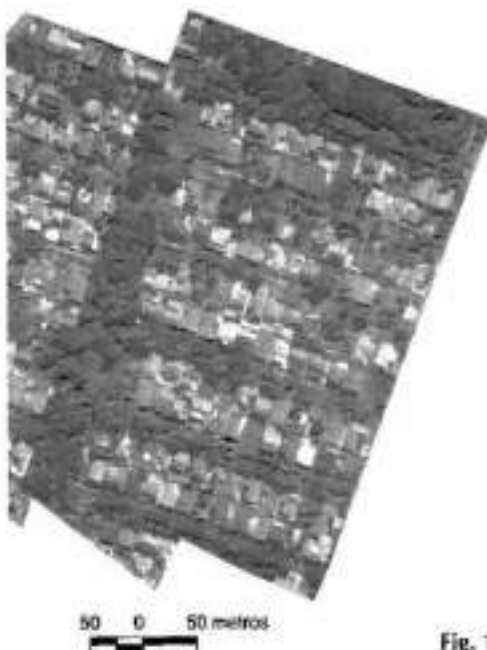


Fig. 19.7 Imagem do bairro Jardim Apolo

### 19.5.4 Vila Acácias

Vila Acácias tem como principal característica a presença de vários galpões, de tamanhos variados, com cobertura de alumínio. É um bairro com construções horizontais, ruas pavimentadas e pouco arborizadas, à exceção da fração leste da imagem, que possui uma concentração de árvores. Outro destaque é a irregularidade de tamanhos, formas e arranjo das edificações (Fig. 19.8).

Vila Acácias foi o primeiro bairro que apresentou valor de coeficiente *Kappa* abaixo de 0,6 (valor de 0,582), classificando seu resultado apenas como bom. Este comportamento pode ser explicado pela presença de todas as classes de cobertura do solo e pela ausência de um padrão único de ocupação deste bairro.

Assim, observa-se a existência de três padrões: edificações com cobertura de Telha Cerâmica e Concreto/Amiãnto Escuro de tamanhos diferenciados e aglomeradas de maneira irregular (canto inferior esquerdo da imagem); construção isolada de tamanho grande em uma área arborizada (canto superior direito) e diversas combinações entre galpões de cobertura metálica, edificações menores e áreas de estacionamento (no restante da imagem). A conjugação desses padrões resulta em uma grande heterogeneidade de tipos de cobertura do solo, tamanho e forma dos objetos.

### 19.5.5 Vila Letônia

Vila Letônia é um bairro com construções horizontais e com ruas asfaltadas e pouco arborizadas. Sua principal característica é o arranjo de suas edificações, que não possuem recuos, e nenhum padrão de organização. Há também heterogeneidade de tamanhos e formas das edificações (Fig. 19.9).

Este bairro teve resultado ainda pior que Vila Acácias, com *Kappa* de apenas 0,502. O comportamento da Vila Letônia pode ser atribuído à dificuldade em se definir os limites dos objetos neste bairro. As edificações são pequenas (menores que 50m<sup>2</sup>), estão praticamente encostadas umas às outras, com materiais de cobertura distintos, porém de cores semelhantes (Telha Cerâmica Velha e Concreto/Amiãnto Escuro). Em outras palavras, trata-se de uma área muito difícil de ser classificada.



Fig. 19.8 Imagem do bairro Vila Acácias

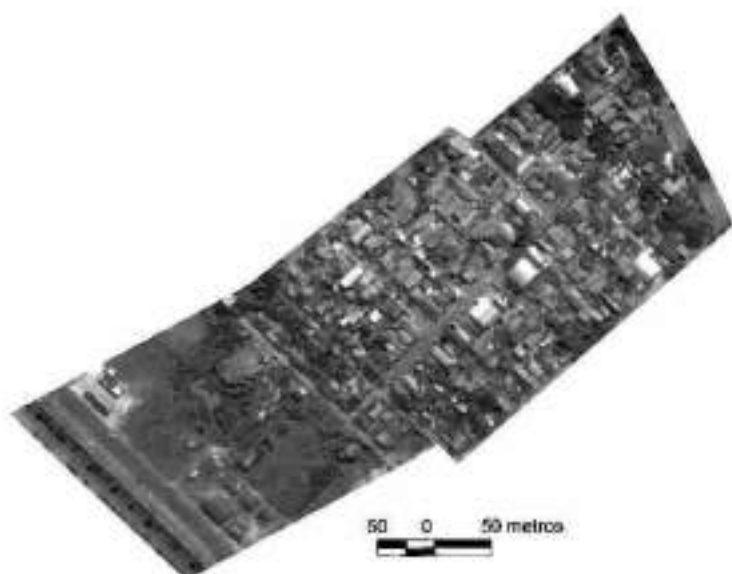


Fig. 19.9 Imagem do Bairro Vila Letônia

## 19.6 Conclusões

Neste trabalho, foram elaborados esquemas de segmentação e redes semânticas específicas para a classificação de cobertura do solo de cinco bairros de São José dos Campos. A análise dos resultados comprova que os diferentes padrões de cobertura do solo influenciam a qualidade temática das classificações. Quanto mais complexo o padrão de ocupação do solo urbano (variedade de materiais de cobertura, heterogeneidade de tamanho das edificações e ausência de um arranjo espacial bem definido), piores são os resultados de exatidão temática das classificações. Por conseguinte, os diferentes padrões de ocupação do solo urbano se constituem em um importante fator a ser considerado na análise de imagens orbitais de alta resolução espacial.

## 19.7 Referências Bibliográficas

- BENZ, U.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 58, (3-4), pp. 239-258, Jan. 2003.
- CENTENO, J.; MIQUELES, A. Extraction of buildings in Brazilian urban environments using high resolution remote sensing imagery and laser scanner data. In: *ISPRS Congress, 20<sup>th</sup>, 2004, Istanbul, Turkey. Proceedings...* Istanbul: ISPRS, pp. 589-692, 2004.
- HOFMANN, P. Detecting informal settlements from Ikonos image data using methods of object-oriented image analysis – an example from Cape Town (South Africa). In: *International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, 2., 2001, Regensburg, Germany. Proceedings...* Regensburg, Germany: Institut für Geographie an der Universität Regensburg, pp. 107-118, 2001(a).



- \_\_\_\_\_. Detecting urban features from Ikonos data using an object-oriented approach. In: *Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society*, 1., 2001, London. *Proceedings...* London: Remote Sensing & Photogrammetry Society, pp. 28-33, 2001(b).
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, pp. 159-174, 1977.
- PINHO, C. M. D. Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos – SP, 179 p., 2005. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- PINHO, C. M.; KUX, H. Dados do Quickbird para subsidiar o planejamento urbano: uma proposta metodológica, Município de São José dos Campos, SP, Brasil. In: *Simpósio Latinoamericano sobre Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial*, 11., 2004, Santiago. *Anais...* Santiago: SELPER, 2004. CD-ROM.
- PINHO, C. M. D.; FEITOSA, F. F.; KUX, H. Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagem Ikonos: Comparação entre a abordagem *pixel-a-pixel* e orientada a objetos. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, pp. 4217-4224, 2005. CD-ROM.
- PMSJC – Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Cidade Viva. [CD-ROM], São José dos Campos, 2003.
- PMSJC – Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Dados Gerais. 2005. Disponível em: <[http://www.sjc.sp.gov.br/html/cid\\_sjcdados.htm](http://www.sjc.sp.gov.br/html/cid_sjcdados.htm)>. Acesso em: fev. 2005.
- REGO, L. F. G. Automatic land-cover classification derived from high-resolution Ikonos satellite image in the urban Atlantic Forest in Rio de Janeiro, Brazil by means of an object-oriented approach, 193 p., 2003. Tese (Forstwissenschaftliche Fakultät). Albert-Ludwigs-Universität, 2003.
- SCHIEWE, J. Segmentation of high-resolution remotely sensed data - Concepts, applications and problems. In: *Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, 2002, Ottawa. *Proceedings...* Canada, 2002.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GeoBIT/GIS*, n. 6, pp. 34-39, June 2001.

## **Análise Multitemporal de Dois Bairros de Belo Horizonte (MG) Usando Classificação Orientada a Objetos de Imagens *Quickbird* e Inferências Espaciais**

Eduardo Henrique Geraldí Araújo, Hermann Johann Heinrich Kux e Teresa Gallotti Florenzano

### **Resumo**

O Brasil demanda o desenvolvimento de métodos e tecnologias que permitam monitorar, analisar e intervir na expansão das cidades. Áreas urbanas, principalmente as de regiões metropolitanas como Belo Horizonte, são altamente complexas e de difícil diagnóstico. Técnicas de classificação orientada a objeto, que usam relações de contexto, hierarquia e lógica *fuzzy* são procedimentos recentes e eficientes no mapeamento do solo urbano, especialmente quando associadas a imagens de alta resolução espacial, como aquelas do satélite *Quickbird* e a informações auxiliares. Esse conjunto de dados e uma análise multitemporal permitem a realização de inferências espaciais, gerando informações que podem subsidiar o planejamento. No entanto, para a realização de estudos multitemporais, modelos de correção geométrica devem ser aplicados às imagens cujas distorções impedem a sua sobreposição direta a dados de origem cartográfica. Neste estudo, foram feitas inferências espaciais para dois bairros de Belo Horizonte (Belvedere e Buritis) baseadas em cenas do *Quickbird* de 2002 e 2004, usando classificação orientada a objetos bem como dados geológicos, geotécnicos e da legislação urbana pertinente. Uma ortoretificação foi realizada em ambas as imagens, adotando-se o modelo rigoroso. Desta forma, foram geradas informações sobre a expansão destes bairros entre 2002 e 2004, ocupações irregulares e áreas com riscos de deslizamento/erosão de encostas, que podem causar danos à propriedade e aos indivíduos.

### **20.1 Introdução e Base Teórica**

A cidade concentra não apenas uma massa de população, mas igualmente desigualdades sociais e territoriais (Abascal, 2005). Nessas condições, a urbe está fragmentada e em constante mudança, impossibilitando a sua representação na totalidade. Por isso, é necessário reunir informações sobre a cidade de maneira localizada e constante. Segundo Bezerra e Fernandes (2000), mudanças recentes no processo de urbanização e na configuração da rede de cidades contribuíram para reforçar a heterogeneidade econômica e social no desenvolvimento das regiões e cidades brasileiras. Na urbanização de Belo Horizonte, verifica-se que a gestão pública pendeu muito mais para o desenvolvimento econômico e a modernização que para a preservação do patrimônio natural e cultural (Moreira et al., 2003).

O sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), devido a seu custo/benefício e a sua tecnologia avançada, têm sido utilizados cada vez mais para gerar informações úteis e dar suporte à tomada de decisões num grande número de aplicações urbanas (Yang, 2003; Congalton e Green, 1999). O *Quickbird* é exemplo de uma nova geração de satélites equipados com sensores de alta resolução espacial, cujos dados garantem qualidade e precisão às aplicações urbanas. No entanto, o uso de todo o potencial das imagens orbitais de alta e muito alta resolução espacial (para maiores detalhes ver Ehlers, 2005) requer um modelo matemático adequado ou uma função de interpolação tridimensional baseada na geometria e orientação do sensor (Büyüksalih et al., 2004). Segundo Toutin (2004), imagens originais contêm tantas e tão significativas distorções que não podem ser sobrepostas diretamente a dados de origem cartográfica num sistema de informações geográficas. Segundo Cheng et al. (2003), dentre os diversos métodos tridimensionais de correção geométrica, três podem ser utilizados em imagens *Quickbird*, a saber: o racional polinomial com os parâmetros matemáticos introduzidos pelo usuário, o racional polinomial com parâmetros fornecidos pelos metadados da imagem e o rigoroso. O primeiro computa os *Rational Polynomial Coefficients* ou *Rapid Positioning Coordinates* (RPC), usando pontos de controle terrestres (*Ground Control Points* – GCP) adquiridos pelo usuário. O segundo método usa um modelo empírico e estatístico (também por meio dos RPCs) que aproxima o modelo físico do sensor (*DigitalGlobe*, 2004). O terceiro método, também chamado de modelo físico, modela todas as distorções decorrentes do movimento da plataforma (posição, velocidade, atitude), do sensor (ângulos de visada, efeitos panorâmicos), da Terra (elipsóide e topografia) e da projeção cartográfica (Toutin, 2004).

Para explorar a riqueza de dados fornecida pelos sensores de alta resolução espacial, torna-se necessária uma ponte entre as já estabelecidas e familiarizadas abordagens de interpretação visual, que acompanham as relações hierárquicas da interpretação dos elementos básicos de imagens, com o processamento de imagens digitais (Herold et al., 2003). Abordagens orientadas a objeto baseadas em segmentação multirresolução, redes hierárquicas, funções de pertinência *fuzzy* (lógica *fuzzy* ou nebulosa), bem como elementos de cognição, têm-se mostrado bastante eficientes para a discriminação da grande quantidade de alvos representados em imagens de alta resolução espacial. A utilização do conceito de objeto é essencial neste tipo de análise de imagens, pois parte-se do princípio de que a informação semântica necessária para a interpretação de uma imagem não está presente no *pixel*, mas, sim, nos objetos da imagem e nas suas relações entre si (Definiens, 2004). Assim, as informações contextuais podem ser descritas e usadas principalmente de duas formas: (a) num contexto espacial em que entidades vizinhas são descritas numa árvore com direção horizontal ou vertical; e (b) num contexto semântico que permite agrupar classes que possuem características semânticas semelhantes (Hofmann e Reinhardt, 2000; Thomas et al., 2003).

A principal característica da segmentação baseada em múltiplas resoluções é a possibilidade de segmentar uma mesma imagem em níveis de escala diferentes que se relacionam entre si, formando uma rede hierárquica que é a base do conhecimento para a classificação dos objetos (Baatz e Schäpe, 2000; Benz et al., 2004). A classificação orientada a objeto permite ao usuário definir regras complexas baseadas em características espectrais e em relações espaciais herdadas. Objetos podem ser definidos e classificados pela estrutura e comportamento de objetos similares (Blaschke et al., 2000; Blaschke e Kux, 2005; Definiens, 2004). A classificação baseada em funções *fuzzy* transforma os valores de atributos de um intervalo arbitrário num

intervalo definido entre zero e um, indicando a pertinência de um objeto a uma classe específica. Dessa forma, cada objeto pode ter uma pertinência *fuzzy* a mais de uma classe, expressa pelo seu grau de adequação aos descritores dessas classes (Blaschke et al., 2000; Definiens, 2004). A maior vantagem desta abordagem é a expressão de incerteza na pertinência e conhecimento (Bock et al., 2005).

Técnicas de processamento digital de imagens de alta resolução espacial permitem a realização de estudos e mapeamentos temáticos detalhados em escalas de até 1:5000, possibilitando a análise sistemática e contextualizada de locais específicos da cidade. Visando contribuir para o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida dos habitantes de Belo Horizonte, este trabalho teve como objetivo avaliar: (1) os processos de ortorretificação de imagens *Quickbird* do tipo *ORStandard*; (2) o desempenho e as características da classificação orientada a objetos; e (3) inferências espaciais com a integração de informações extraídas de imagens *Quickbird* e de outras fontes num Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para atingir esses objetivos, selecionaram-se como áreas-testes dois bairros desta metrópole: Belvedere e Buritis.

## 20.2 Descrição Sucinta das Áreas-testes

Foram analisadas duas cenas do satélite *Quickbird* da área de estudo, referentes a 2002 e 2004 (Fig. 20.1).

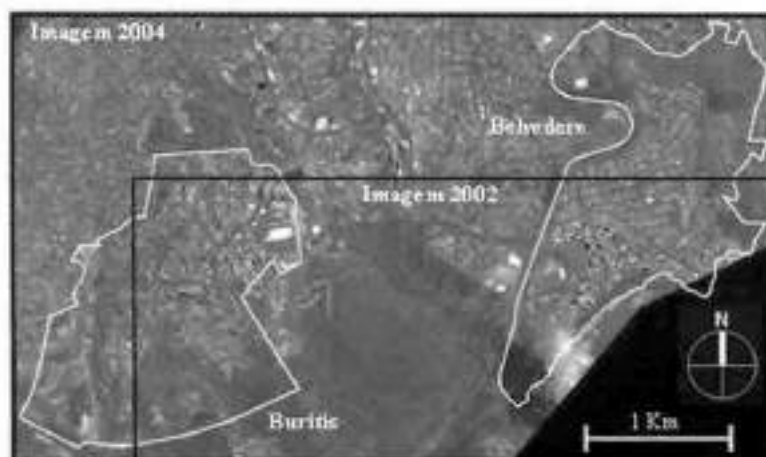


Fig. 20.1 Área de estudo e imagens utilizadas

Como as imagens disponíveis eram de datas recentes e compreendiam um intervalo de tempo curto, a escolha desses bairros deu-se principalmente pelo fato de ambos terem sofrido grandes alterações nesse período. Além disso, são locais que vêm demonstrando problemas decorrentes da alta densidade de ocupação com uma malha viária insuficiente para suportar o número de veículos. Apresentam aumento da impermeabilização do solo, em consequência das construções em paralelo com a diminuição da área verde e da alteração da paisagem

natural. Essas questões indicam a necessidade de um monitoramento constante e de um estudo da evolução da ocupação desses bairros, analisando-se os aspectos legais e técnicos relevantes na discussão sobre o desenvolvimento da cidade.

Com relação às características gerais da geologia, geotecnia e do relevo, em ambos os bairros ocorre uma sucessão de rochas metassedimentares com direção geral NE-SW e mergulho de 45° para SE (Silva et al., 1995). Nas encostas voltadas para SE, as condições são desfavoráveis especialmente para as fundações rasas. No que se refere à execução de taludes, há grande probabilidade de escorregamentos rasos ao longo do plano da xistosidade. Por todos esses motivos, as encostas que coincidem com a direção, sentido e ângulo do mergulho ou xistosidade das camadas tendem a possuir menor estabilidade, principalmente em áreas de filitos. No caso do bairro Burity, estes pontos são agravados pelo relevo caracterizado por grandes declividades e amplitudes altimétricas, que favorecem escorregamentos. Silva et al. (1995) recomendam um modelo de assentamento preferencial nas encostas a NW com edificações intercaladas por amplos vazios. Entretanto, essas recomendações não têm sido obedecidas, já que se verifica um grande adensamento populacional com edifícios cada vez mais próximos.

### 20.3 Desenvolvimento do Estudo

Os procedimentos metodológicos usados neste trabalho foram realizados de acordo com uma seqüência que teve como objetivo otimizar o tempo e o uso do material e das técnicas disponíveis. Para facilitar o entendimento do estudo, os resultados de cada etapa são apresentados em conjunto com os procedimentos de acordo com esta seqüência: correção geométrica, classificação orientada a objetos e inferências espaciais.

#### 20.3.1 Correção geométrica

A qualidade da correção geométrica depende fortemente da topografia do terreno e do número, exatidão e distribuição dos pontos de controle terrestres (Tao e Hu, 2002). As etapas deste procedimento compreendem: a coleta de dados (curvas de nível e pontos de controle), a geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução compatível (Silva e Vergara, 2005), a ortorretificação e a avaliação da sua qualidade. O modelo digital de terreno foi gerado a partir de curvas de nível, na escala de 1:2000, fornecidas pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel). Os pontos de controle (total de 30), que abrangem toda a área de estudo, foram coletados em campo com GPS em modo diferencial (relativo), buscando garantir a sua boa distribuição e que as feições de interesse estivessem representadas em ambas as imagens (2002 e 2004). Foi utilizado como base um ponto de primeira ordem localizado a cerca de 6,3 km do centro da área de estudo. Depois de coletados e pós-processados, os pontos foram divididos entre pontos de controle e teste, mantendo uma boa distribuição.

Com todos os dados necessários disponíveis, realizou-se a ortorretificação das imagens de 2002 e 2004. Inicialmente, observou-se que o deslocamento das imagens originais, em relação aos pontos de teste adquiridos em campo (verdade terrestre), estava acima do aceitável para a escala pretendida neste estudo. Buscou-se, então, o melhor método de correção geométrica aplicável aos dados disponíveis, considerando o tipo de imagem, a rapidez (custo computacional e operacional) e a qualidade final. Foram testados dois modelos: o racional polinomial (RPC) e

o de satélite orbital (rigoroso). Para o primeiro, foram feitos alguns testes, utilizando diferentes dados de entrada (MDT e Pontos de Controle) e combinações que evidenciaram a melhora das correções de acordo com a maior exatidão dos dados de entrada (Fig. 20.2).



Fig. 20.2 Exemplos de resultados obtidos no processo de ortoretificação

Depois da realização dos testes e visando executar a melhor ortoretificação possível para os dados disponíveis, aplicamos o modelo rigoroso nas imagens de 2002 e 2004. A disponibilidade de um módulo de correção geométrica de imagens *Quickbird ORStandard* pelo método rigoroso no aplicativo PCI permitiu alcançar grande precisão nos resultados, com a vantagem de se utilizar cenas menores e já com um certo nível de processamento (Cheng et al., 2003; PCI Geomatics, 2005). Após as correções geométricas, as imagens foram fusionadas pelo método de principais componentes e foi realizada uma avaliação da qualidade desses produtos (Fig. 20.3) calculando-se o Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square – RMS*).

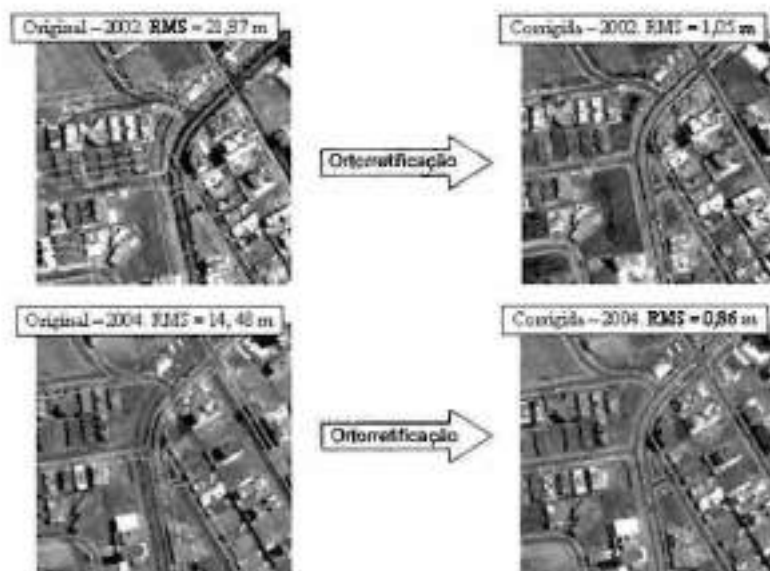


Fig. 20.3 Imagens originais e corrigidas com seus respectivos RMS em metros

Pelos erros médios quadráticos encontrados (1,05m e 0,86m) em ambas as imagens corrigidas, elas podem ser utilizadas em estudos na escala 1:5000, ou seja, para a escala desejada

neste trabalho. Estes resultados estão de acordo com as exigências da Sociedade Brasileira de Cartografia em relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-A), para esta escala (Brasil, 1984).

### 20.3.2 Classificação orientada a objetos

Depois de corrigidas geometricamente e fusionadas, as imagens, assim como um cadastro urbano (usado como *layer* temático auxiliar), foram recortadas, respeitando-se os limites dos bairros em estudo, e importadas para o software aplicativo de classificação (*e-Cognition*). Esta etapa envolveu os seguintes procedimentos: o processamento (correção/ajuste) das imagens e dos dados cartográficos utilizados como base, a definição das classes de cobertura do solo, a segmentação das imagens, a determinação da hierarquia entre essas classes, a definição das regras de pertinência e a avaliação dos resultados das classificações.

A definição das classes partiu da interpretação visual das imagens de satélite e das ortofotos, com o suporte das observações de campo. Foram elaboradas chaves de interpretação a partir dos elementos de cor, textura, forma, tamanho, sombra, altura, padrão e localização (Florenzano, 2002). As classes definidas para o mapeamento e suas principais características encontram-se na Tab. 20.1. É importante mencionar que as análises das características de cada classe e suas chaves de interpretação indicaram, inicialmente, os atributos a serem usados na classificação por meio das regras de pertinência *fuzzy*.

Tab. 20.1 Classes definidas para o estudo

Classes	Características descritivas
Asfalto	Possibilidade de ser mapeado com o auxílio do cadastro urbano.
Branco	Alto valor de brilho. Não-discriminação dos materiais constituintes. Formas variadas.
Coberturas	Impermeáveis. Coberturas de grandes edifícios. Muitas variações de tonalidade e brilho.
Fiare	Nível de quantização próximo a 2048.
Piscina	Alta resposta no azul. Em alguns casos, no verde. Formas geométricas regulares.
Telha cerâmica	Bordas lineares. Padronizadas conforme legislação. Geometria variável. Resposta no vermelho. Grande variação de tonalidade.
Solo exposto	Terreno modificado (terraplanagem). Sem presença de vegetação. Resposta no vermelho. Formas irregulares. Variações de tonalidade.
Sombra	Baixo brilho. Proximidade de altos edifícios e vegetação arbórea.
Vegetação arbórea	Alta resposta no infravermelho próximo. Textura provocada pela sombra das diferentes alturas das árvores. Formas variadas. Em alguns casos sobre ruas.
Vegetação rasteira	Alta resposta no infravermelho próximo. Textura uniforme. Presença de resposta do vermelho pela presença do solo. Formas variadas.

### Segmentação

A segmentação é o primeiro passo para a classificação, e a partir dela são criados os objetos, foco desta abordagem. Foram gerados três níveis de segmentação. A primeira segmentação, posteriormente denominada "Nível 2", teve como objetivo separar os diferentes objetos de

interesse do ambiente urbano, neste caso, as edificações. Nesta segmentação, foram priorizadas a cor e a suavidade (*smoothness*) em detrimento da forma e compacidade (*compactness*); assim, alcançaram-se objetos com bordas mais suaves (lineares), por exemplo, casas e prédios. Na segunda segmentação, posteriormente tratada como "Nível 3", utilizaram-se parâmetros que priorizaram a forma e buscaram objetos grandes iguais aos polígonos do dado temático do cadastro urbano. No Nível 1, na terceira segmentação realizada, reduziu-se o limiar de escala a fim de se obterem objetos menores que aqueles de interesse que possibilitaram criar descritores baseados em textura. Os Níveis 1 e 3 foram criados para auxiliar na definição dessas regras e limites, além de permitir que os objetos de interesse reconhecessem seus superobjetos (Nível 3) e seus subobjetos (Nível 1). Depois de classificados, os objetos desses níveis auxiliares puderam ser usados na definição das classes de interesse.

### Rede hierárquica

A rede hierárquica permite a relação entre as classes e seus grupos. Desenvolveu-se então uma rede em que os objetos mais facilmente distinguíveis têm uma posição superior em relação aos de maior confusão. Os objetos foram divididos, *a priori*, como pertencentes ou não às classes de maior separabilidade. Assim, facilitou-se a criação das regras, investigando somente as características de uma classe. A hierarquia foi desenvolvida em decorrência da não-associação dos objetos às classes superiores (Fig. 20.4). Isso foi feito para que as classes com maior confusão ficassem nos níveis mais baixos da hierarquia, diminuindo o erro da classificação e ressaltando-se a limitação do processo.

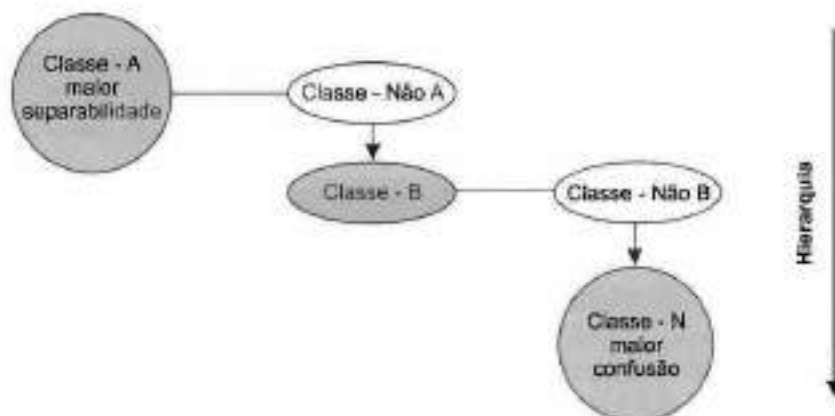


Fig. 20.4 Esquema do procedimento aplicado na construção da hierarquia

### Regras de pertinência

A definição das regras de pertinência possui um peso muito grande no desempenho de uma classificação, pois aqui são definidos os atributos usados pelo classificador. Inicialmente foi visualizado o comportamento dos objetos em relação a um determinado atributo especializado por meio de uma imagem em nível de cinza gerada no próprio *eCognition*. Esta espacialização



foi feita para diversos atributos e assim foi possível identificar quais desses atributos podem ser utilizados na separação das classes. Para identificar os limites de separação entre as classes com maior exatidão, foram coletadas amostras de cada classe. Os histogramas dessas amostras foram usados para limitar a curva de cada uma das classes representadas e assim separá-las. Procurou-se atribuir o menor número possível de regras para cada classe a fim de evitar o aumento da confusão do classificador. Na Tab. 20.2, estão descritas as regras definidas para as classes de interesse no Nível 2 da classificação referente ao bairro Belvedere em 2004. Informações mais detalhadas sobre as regras e a rede hierárquica das demais classificações e níveis encontram-se em Araújo (2006).

Tab. 20.2 Regras de pertinência utilizadas na classificação da imagem de 2004 do bairro Belvedere

Classes	Regras
Vegetação arbórea	VEGETAÇÃO; Brilho; Índice de vegetação; Textura: Média dos subobjetos na banda 4.
Vegetação rasteira	VEGETAÇÃO; Brilho; Índice de vegetação; Textura: Média dos subobjetos na banda 4; Não-existência de "asfalto" como objetos vizinhos.
Asfalto	NÃO-VEGETAÇÃO; Brilho; Existência de superobjetos "ruas" (cadastro).
Sombra	NÃO-VEGETAÇÃO; Brilho; Não-existência de superobjetos "fora da área".
Branco	NÃO-SOMBRA; ALTO BRILHO; Brilho.
Flare	NÃO-SOMBRA; ALTO BRILHO; Brilho.
Telha cerâmica	NÃO-ALTO BRILHO; VERMELHO; Índice de vegetação; Não é asfalto; Relação de área com os subobjetos "telha de barro".
Solo exposto	NÃO-ALTO BRILHO; VERMELHO; Não é telha; Brilho; não é asfalto; Razão da banda 3 pelas demais; Índice de vegetação.
Coberturas	NÃO-VERMELHO; AZUL; Brilho; Índice de vegetação; Relação de área com os subobjetos "azul (n1)"; Não é asfalto; Não é piscina.
Piscina	NÃO-VERMELHO; AZUL; Brilho; Não é asfalto; NDVI; Razão da banda 3 e da banda 1 pelas demais; Relação de área com os subobjetos "azul (n° 1)".

As classes destacadas (CAIXA ALTA) na tabela anterior foram introduzidas no processo para compor a hierarquia e conter algumas regras herdadas pelas classes hierarquicamente inferiores. Dessa forma, as classes inferiores possuem dois conjuntos de regras: as desenvolvidas especificamente para aquela classe e as herdadas das classes superiores.

### Classificações

Destacamos aqui os resultados mais significativos obtidos com a classificação orientada a objetos, bem como suas peculiaridades, desafios e possibilidades. A primeira classificação realizada foi na imagem de 2004 do bairro Belvedere, que serviu como base para a classificação das demais imagens. Por esse motivo, e com o intuito de avaliar a possibilidade de automatização do processo, muitos procedimentos desta classificação foram repetidos nas demais. As maiores dificuldades encontradas na separação das classes foi a discriminação entre vegetação arbórea e vegetação rasteira e entre telha de barro e solo exposto. Para diminuir a confusão entre as duas

classes do primeiro caso, foi introduzida uma regra que diferenciava ambas as classes quanto ao número de subobjetos contidos no alvo de interesse. Trata-se de um atributo de textura, de implementação possível devido à introdução de um nível inferior ao de interesse. Em muitos casos, a vegetação arbórea possui um número maior de subobjetos pela presença de sombra entre as folhas, proporcionando maior textura. Na Fig. 20.5, observa-se visualmente, nos locais indicados, o avanço da separação das classes de vegetação rasteira e arbórea com o uso da regra de textura.

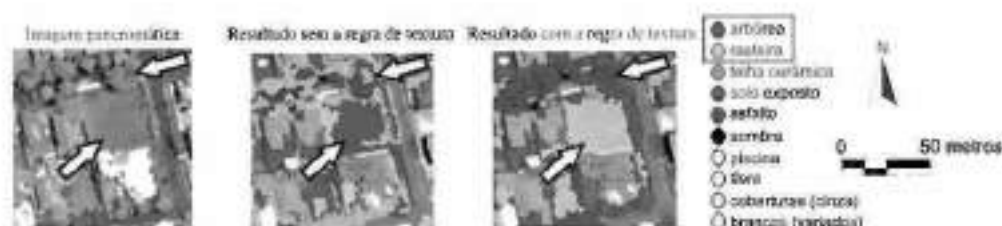


Fig. 20.5 Exemplo do desempenho da classificação da imagem de 2004 do bairro Belvedere, com a adição da regra de textura

Para o segundo caso, as classes "solo exposto" e "telha de barro" possuem materiais com respostas espectrais muito semelhantes na faixa do visível. Na análise das características dessas classes, notou-se que, em média, as amostras da classe "telha cerâmica" apresentavam valores do índice de vegetação (razão da banda 4 pela 3) maiores que aquelas da classe "solo exposto". Isso pode ser devido à presença de vegetação de pequeno porte nas telhas mais antigas. Como grande parte das residências com esse tipo de cobertura é antiga, é provável que essa vegetação tenha se instalado ali. Além disso, as imagens usadas são do período chuvoso, o que contribui para a proliferação dessa vegetação. Sendo o solo exposto na região produto de terraplanagem, toda a vegetação foi retirada para a instalação de edificações. Criou-se então uma regra que limitou a resposta dos objetos quanto ao índice de vegetação, o que diminuiu a confusão entre as duas classes.

Como parâmetro para a avaliação da qualidade das classificações foi usado o índice *Kappa*. Para esta análise foram coletadas, aleatoriamente, cerca de 30 amostras por classe que serviram como verdade terrestre. Além disso, com o objetivo de avaliar a incerteza da classificação, foi gerado um mapa de estabilidade por meio da espacialização da diferença entre o maior e o segundo maior grau de pertinência de um objeto. Cabe salientar que um objeto classificado com um alto grau de ambigüidade não significa que tenha sido erroneamente classificado, porém que ele não pertence explicitamente a uma determinada classe. Os resultados com os valores de *Kappa* por classe e global das quatro classificações constam da Tab. 20.3.

Conforme pode ser observado nessa tabela, os resultados obtidos são muito bons. Os valores do índice global de *Kappa* para as quatro classificações variam entre "muito bom" e "excelente", em relação à tabela de referência desenvolvida por Landis e Koch (1977). Para a classificação da imagem de 2004 do Belvedere, os valores de *Kappa* por classe são muito elevados, com exceção das classes "arbórea", "rasteira" e "flora". No caso de vegetações "rasteira" e "arbórea", o baixo resultado deve-se à confusão entre estas classes, embora ela tenha diminuído

com a adição de algumas regras. A classe *flare* contou com um número reduzido de amostras de teste pela sua baixa representatividade. Verificou-se uma tênue diferença entre alguns objetos com alto brilho e outros saturados. Na vizinhança de *pixels* saturados (*flare*) sempre existem *pixels* de alto brilho, influenciados por aqueles, o que dificulta a identificação e a separação entre eles. Cabe ressaltar o acerto de 100% dos objetos classificados como "asfalto", o que só foi possível devido ao compartilhamento das informações do cadastro contidas no Nível 3. Quanto à análise de incertezas, observou-se, no mapa, que os objetos menos estáveis são aqueles relacionados às classes de vegetação ("arbórea" e "rasteira"), o que já era esperado devido à grande confusão entre estas classes. No mapeamento do bairro Belvedere com a imagem de 2002, a tabela indica que os valores individuais e totais, apesar de muito bons, são inferiores aos obtidos na imagem de 2004. Isso ocorreu principalmente entre as classes de maior confusão, como é o caso da "telha cerâmica" e "solo exposto". Provavelmente, outros resultados poderiam ser obtidos se outros limiares e atributos fossem testados visando aumentar a separação das classes. Nota-se que a classe *flare* apresentou resultado zero no índice individual de *Kappa*. Além dos fatores mencionados na análise desta classe na imagem de 2004, há aqui a possibilidade de não existirem objetos com as mesmas características daqueles mapeados na data de 2004. A análise de estabilidade da classificação desta imagem (2002) ficou muito próxima da imagem de 2004, porém, com um maior número de objetos não classificados.

Tab. 20.3 Resultados do índice *Kappa* global e por classe das classificações realizadas

Classificação da imagem de 2004 do bairro Belvedere										
Avaliação	Asfalto	Branco	Coberturas	Flare	Piscina	Cerâmica	Solo	Sombra	Arbórea	Rasteira
<i>Kappa</i> /classe	1	1	0,96	0,60	0,93	1	0,78	0,89	0,53	0,77
<b><i>Kappa</i> Total</b>										<b>0,86</b>
Classificação da imagem de 2002 do bairro Belvedere										
Avaliação	Asfalto	Branco	Coberturas	Flare	Piscina	Cerâmica	Solo	Sombra	Arbórea	Rasteira
<i>Kappa</i> /classe	1	1	0,60	0	0,78	0,93	0,56	0,96	0,42	0,61
<b><i>Kappa</i> Total</b>										<b>0,75</b>
Classificação da imagem de 2004 do bairro Buritis										
Avaliação	Asfalto	Branco	Coberturas	Flare	Piscina	Cerâmica	Solo	Sombra	Arbórea	Rasteira
<i>Kappa</i> /classe	0,95	0,96	0,89	1	0,63	0,49	0,93	1	0,84	0,84
<b><i>Kappa</i> Total</b>										<b>0,84</b>
Classificação da imagem de 2002 do bairro Buritis										
Avaliação	Asfalto	Branco	Coberturas	Flare	Piscina	Cerâmica	Solo	Sombra	Arbórea	Rasteira
<i>Kappa</i> /classe	1	0,82	0,92	1	0,60	0,52	0,70	1	0,62	0,77
<b><i>Kappa</i> Total</b>										<b>0,77</b>

O resultado da avaliação da classificação da imagem de 2004 do bairro Buritis mostra uma melhor separação das classes de vegetação em relação aos resultados obtidos anteriormente, devido à inclusão de um novo atributo (razão da banda 4 pela 3) de distinção entre vegetação "rasteira" e "arbórea". Observa-se também que houve uma diminuição dos valores da classe "telha cerâmica" e "piscina", provavelmente porque são classes com pouca representatividade nesse bairro. O mapa de estabilidade apresentou um número menor de objetos ambíguos em relação aos resultados encontrados com as imagens do Belvedere, porque aqui as regras de pertinência

definiram com maior clareza os objetos das classes "arbórea" e "rasteira". A análise dos resultados da classificação da imagem de 2002 do Buritis revela um desempenho inferior em relação ao da imagem de 2004, como ocorreu com o bairro Belvedere. Esse resultado indica que as regras elaboradas para a imagem de uma determinada data não serão necessariamente úteis em outras imagens. O mapa de estabilidade para essa classificação confirma o fato de que as incertezas nas classes de vegetação diminuíram com a adição de mais uma regra para separá-las em relação às imagens do Belvedere. Quanto às demais classes, nota-se que, embora com uma exatidão um pouco inferior que a da classificação da imagem de 2004, a estabilidade dos seus objetos teve pouca alteração.

De modo geral, no procedimento de classificação das imagens, verificou-se que a rede hierárquica desenvolvida para a imagem de 2004 do Belvedere pôde ser utilizada nas demais classificações com pequenos ajustes. Já as regras de pertinência tiveram de ser adaptadas ou até mesmo modificadas. Isso ressalta que interferências na radiação que chega ao sensor, como fatores climáticos e ângulo de visada *off-nadir*, devem ser consideradas, principalmente em estudos multitemporais.

### 20.3.3 Inferências espaciais

A partir de informações disponíveis (Geologia/Geotecnia, Risco Geológico e Legislação) e daquelas geradas nas etapas anteriores deste trabalho sobre a área de estudo, foram realizadas algumas inferências espaciais, com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada da área de estudo e apontar questões relevantes à qualidade de vida da população.

#### Expansão urbana no período de 2002-2004

A análise da expansão urbana foi feita para quantificar o aumento de impermeabilização do solo, em metros quadrados, no período de 2002 e 2004 (Tab. 20.4). Para tanto, utilizaram-se as classificações referentes a essas duas datas. Calcularam-se as áreas correspondentes às classes de áreas impermeabilizadas de 2004, as quais foram subtraídas daquelas de 2002 para os dois bairros independentemente. De forma semelhante foi quantificada a diminuição de área verde.

A primeira observação que pode ser feita ao se analisar a Tab. 20.4, diz respeito à diferença nos totais de todas as classes. Isto é devido aos objetos não classificados que variam por imagem. Quanto ao aumento da impermeabilização do solo urbano demonstrado pela diferença entre 2002 e 2004 das classes "asfalto", "brancos", "coberturas" e "telha de barro", pode-se dizer que o resultado comprova o adensamento urbano desses bairros neste período. É interessante observar que a imagem de 2004 apresenta maior área de sombra pelos seguintes motivos: 1) a imagem de 2002 foi obtida com ângulo de visada lateral, fazendo com que parte da sombra fosse encoberta pela geometria distorcida do objeto; 2) houve um aumento do número de altos edifícios identificados na imagem mais recente. Este último fato pode explicar a diminuição de área da classe "asfalto" em 2004 para o bairro Belvedere. A sombra é um fator que altera consideravelmente os resultados, sendo, sem dúvida, um elemento a ser considerado em estudos urbanos.

Um processo de substituição de residências unifamiliares por edifícios verticais multifamiliares (cuja cobertura normalmente é metálica, amianto ou cimento), devido ao alto

Outra razão para isso é a possibilidade de que as regras de pertinência criadas para as classes de "telha cerâmica" e "solo exposto" não tenham diminuído a confusão entre a diminuição da área verde e o incremento de cobertura impermeabilizáveis são fortes indícios de que esses bairros têm-se desenvolvido de maneira prejudicial à qualidade de vida da população, o que reforça a necessidade da tomada de ações visando frear o seu adensamento urbano.

Tab. 20.4 Áreas das classes de cobertura do solo obtidas das imagens de 2002 e 2004 dos Blevédere e Buritys

Classes	Áreas das classes de cobertura do solo – M <sup>2</sup>			
	Buritys 2002	Buritys 2004	Blevédere 2002	Blevédere 2004
Asfalto	122242,68	124766,55	158930,93	161111,11
Branco	45029,28	52157,18	52563,32	52563,32
Cobertura (cinza)	412876,79	444673,80	203189,71	274111,11
Flora	2331,36	631,60	93,60	0
Fisca	471,60	626,75	2994,12	2777,78
Sombra	58006,66	60250,49	42084,60	59444,44
Solo exposto	125836,68	68027,66	242981,73	182111,11
Telha de terra	2463,32	4576,32	67917,02	66666,67
Vegetação arbórea	430268,43	501247,46	199426,95	173333,33
Vegetação rasteira	591191,35	437422,71	165793,33	181111,11
<b>Total</b>	<b>1757990,98</b>	<b>1756386,63</b>	<b>1170494,70</b>	<b>1167347,78</b>
<b>2004 – 2002</b>		<b>1602,36</b>		<b>-3147,02</b>
<b>Total impermeável</b>	<b>588858,07</b>	<b>636175,84</b>	<b>519681,34</b>	<b>570177,78</b>
<b>2004 – 2002</b>		<b>46319,77</b>		<b>56500,00</b>
<b>Total vegetação</b>	<b>981459,79</b>	<b>938670,19</b>	<b>365222,18</b>	<b>360888,89</b>
<b>2004 – 2002</b>		<b>-42789,60</b>		<b>-44333,89</b>

### Risco de deslizamento de encostas

Para esta análise, foram introduzidos no SIG dados de geologia, orientação de vertente e declividade. Os dois últimos foram derivados do modelo digital de terreno. Um mapa geológico (Silva et al., 1995) e descrições geotécnicas foram usados para identificar as características importantes sobre esses temas nos locais estudados. Definindo uma operação booleana, resultado destacou as áreas com vertentes voltadas para SE e com alta declividade (Fig. 20.10), uma vez que elas são as mais suscetíveis a deslizamento.

Ao comparar esses mapas, verifica-se que o bairro Buritys possui maior área propensa ao deslizamento de encostas, pelo predomínio de relevo caracterizado por declividades e amplitudes altimétricas. Esta análise é um alerta relevante para que futuras decisões de desmatamento e loteamentos levem essas informações em consideração.



Fig. 20.6 Mapa de risco ao deslizamento de encostas nos bairros Burity e Belvedere.

### Ocupação irregular

O objetivo desta análise foi mapear as edificações que se encontram em locais impróprios no que diz respeito à legislação e à variável declividade (Fig. 20.7). Para isso, foram integrados no SIG, com o uso de um programa em LEGAL (INPE, 2005), os mapas de cobertura do solo e declividade, bem como as informações da legislação vigente para os bairros (baseadas em mapas da Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo – Belo Horizonte, 1996 e 2000). Basicamente foram destacadas edificações que estavam localizadas em áreas com declividade maior que 47% e/ou em áreas de Zona de Proteção Ambiental (ZPAM). Com esse tipo de procedimento, é possível agilizar a identificação de áreas em desacordo com alguma restrição legal por meio da integração de dados num SIG.



Fig. 20.7 Exemplos de edificações em locais irregulares

### Prejuízos à população

Nesta análise, reuniu-se o maior número de variáveis e procedimentos. Aqui a intenção foi usar um método de processamento que permitisse a atribuição de pesos diferentes para cada

uma das informações consideradas. Foram incorporadas quatro categorias num processo analítico-hierárquico (AHP): áreas críticas (Fig. 20.8), classificação da cobertura do solo, legislação específica e declividade. A importância maior foi dada à categoria que continha as áreas críticas, pois é a partir dessas áreas que o prejuízo à população é derivado, nesta análise. O mapa de "áreas críticas" baseou-se em três mapas de risco geológico obtidos da Prodabel, que continham áreas de alto risco geológico em relação a escavação, escorregamento e erosão. Essas informações foram agrupadas num único mapa com locais sujeitos a nenhum, um, dois ou aos três riscos geológicos mencionados.

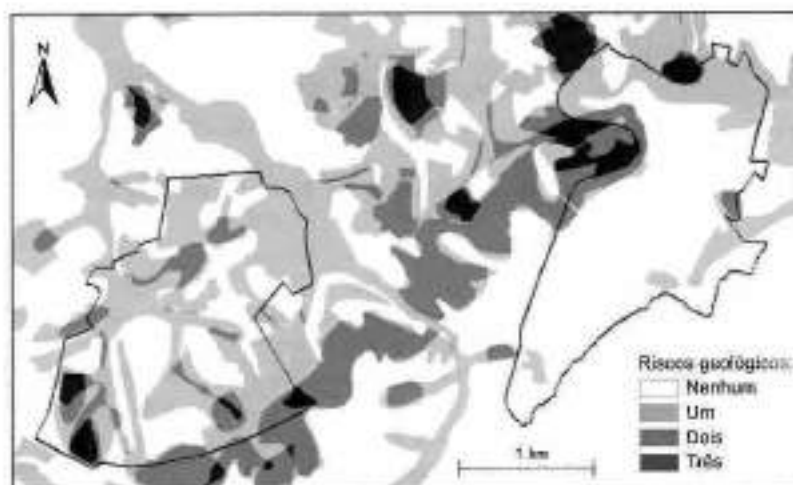


Fig. 20.8 Mapa de áreas críticas das bairros estudados.

Cada uma das categorias incorporadas ao processo foi comparada com as demais, o que permitiu estabelecer uma hierarquia e, com o uso de uma ferramenta de suporte à decisão, atribuir pesos para cada fonte de informação. Depois de definir a hierarquia entre as categorias e observar uma baixa razão de consistência, gerou-se um programa em Legal que foi editado com os valores dos pesos de cada uma das classes das categorias propostas. Depois de editado e executado, o programa produziu um mapa numérico ponderado. A partir dessa grade numérica, gerou-se uma imagem que foi posteriormente associada a uma variação em níveis de cinza que representam desde os locais com baixa (Preto) até aqueles com alta (Branco) suscetibilidade de prejuízo à população (Fig. 20.9).

Os locais de interesse nesta inferência são aqueles representados pelos níveis de cinza do quarto quartil da graduação. Essas são áreas que têm uma legislação mais branda, o que incentiva o incremento de edificações, e características geotécnicas desfavoráveis, o que aumenta o risco de prejuízos à população. Cabe mencionar que o enfoque desta análise é o prejuízo à população porque as áreas de risco geológico, sua principal fonte de informações, foram determinadas com esse objetivo. O "risco geológico" aqui é tratado como a associação de diversas atividades que possibilitam a ocorrência de eventos que trariam prejuízos à população, sendo esses eventos provocados ou não pela ação do homem (Silva et al., 1995). Esse risco, no entanto, está sujeito



Fig. 20.9 Mapas de prejuízo à população dos bairros Buritis e Belvedere

à presença de fatores predisponentes e à ocorrência de eventos desencadeadores como chuvas fortes ou construções. Nos mapas apresentados, observa-se que o bairro Buritis possui um número maior de áreas de risco por ter um comportamento geotécnico mais propício e uma legislação menos restritiva. Áreas com alta declividade e com risco geológico estão incluídas num zoneamento de adensamento preferencial. Isso é um alerta para a necessidade de planejar o uso e a ocupação urbana desses locais. Sugerimos, a partir dessas análises, alterar ou criar novas limitações para a expansão urbana.

#### 20.4 Conclusões e Recomendações

A partir dos resultados obtidos concluímos que:

- A correção geométrica foi essencial para a efetiva realização do trabalho, permitindo a correta sobreposição das duas imagens utilizadas (entre si e em relação ao cadastro urbano) e a realização das inferências espaciais com os dados auxiliares.
- A avaliação das classificações possibilitou utilizar o mapa de cobertura do solo gerado na etapa seguinte deste trabalho.
- Os resultados indicaram a necessidade de se manter uma base de dados atualizada e confiável.
- Este estudo demonstrou a possibilidade de mapear áreas com tendências de crescimento e risco, além de auxiliar na regulamentação urbana das cidades.

Com base nesses resultados e a fim de avançar na qualidade e precisão de análises urbanas, destacam-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Usar um Modelo Digital de Superfície (DSM) para ortorretificar os objetos e edifícios representados nas imagens. Deve-se investigar a influência do uso do DSM sobre as áreas de oclusão pela visada do satélite.



- Avaliar o uso de imagens, da mesma área de estudo, obtidas com vários ângulos de visada. Optar por ângulos complementares para que seja possível gerar pares estereoscópicos e obter informações sobre a cobertura do solo em áreas oclusas em outras imagens.
- Testar a eficácia do DSM na distinção entre solo exposto e telhas de barro.
- Investigar descritores capazes de separar as classes de coberturas cinzas como amianto, telhas metálicas e cimento.
- Procurar mapear objetos de várias classes que estão em áreas de sombras.

## 20.5 Referências Bibliográficas

- ABASCAL, E. H. S. Cidade e arquitetura contemporânea: uma relação necessária. *Arquitextos*, n. 066. Texto especial 338., nov. 2005. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp338.asp>>. Acesso em: 1º.3.2006
- 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)*. 159 p., 2006. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mte-m13.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.43>>.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image interpretation. In: STROBL, J.; BLASCHKE, T. (Hrsg): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe. H.Wichmann Verlag, pp. 12-23, 2000.
- BELO HORIZONTE. Lei nº 8.137, de 21.12.2000. Altera as Leis nºs 7.165 e 7.166 ambas de 27.08.1996 e dá outras providências. Disponível em: <[www.pbh.gov.br/mapas/leiuso/lei-8137.htm](http://www.pbh.gov.br/mapas/leiuso/lei-8137.htm)>.
- \_\_\_\_\_. Lei nº 7.165, de agosto de 1996. Institui o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte. Disponível em: <[www.pbh.gov.br/siga/procuradoria/pgmlegis.htm](http://www.pbh.gov.br/siga/procuradoria/pgmlegis.htm)>.
- BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, L.; HEYNE, M. Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 58 (3/4), pp. 239-258, 2004.
- BEZERRA, M. C. L.; FERNANDES, M.A. *Cidades sustentáveis: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Consórcio Parceria 21 IBAM-ISER-REDEH, 2000.
- BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP, E.; STROBL, J.; ZEIL, P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. *Environmental Information for Planning*, v. 2, pp. 555-570, Jan. 2000.
- BLASCHKE, T.; KUX, H. *Sensoriamento Remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores*. São Paulo: Oficina de Textos, 286 p., 2005.
- BOCK, M.; XOFIS, P.; MITCHLEY, J.; ROSSNER, G.; WISSEN, M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. *Journal for Nature Conservation*, v. 13 (2/3), pp. 75-89, July 2005.

- BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20.6.1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/index7a0.html?q=node/41>>.
- BÜYÜKSALIH, G.; MURAT, O.; KARSTEN, J. Precise Georeferencing of rectified high resolution space images. In: XXth ISPRS Congress, *Proceedings*. Istanbul: ISPRS, v. 35, pp. 184-188, 2004.
- CHENG, P.; TOUTIN, T.; ZHANG, Y.; WOOD, M. QuickBird – geometric correction, path and block processing and data fusion. *EOM*, v. 12 (3), pp. 24-30, May 2003.
- CONGALTON, R.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Boca Raton: CRC/Lewis, 137 p., 1999.
- DEFINIENS eCognition: *User Guide 4*. Germany, 486 p., 2004.
- DIGITALGLOBE INC. QuickBird Imagery Products: Product Guide. Longmont, Colorado, 2004.
- DONNAY, J.; BARNSELY, M. J.; LONGLEY, P. A. Introduction. In: DONNAY, J.; BARNSELY, M. J.; LONGLEY, P. A. *Remote Sensing and urban analysis*. London: Taylor & Francis, cap. 1, pp. 3-18, 2001.
- EHLERS, M. Sensoriamento remoto para usuários de SIG – Sistemas sensores e métodos: as exigências e a realidade. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. *Sensoriamento Remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores*. São Paulo: Oficina de Textos, 286 p., pp. 19-32, 2005.
- FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97 p., 2002.
- HEROLD, M.; LIU, X.; CLARKE, K. C. Spatial Metric and Image Texture for Mapping Urban Land Use. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 69 (9), pp. 990-1001. Sept. 2003.
- HOFMANN, P.; REINHARDT, W. The extraction of GIS features from high resolution imagery using advanced methods based on additional contextual information – first experiences. *Proceedings*, v. XXXIII, pp. 51-58, Amsterdam 2000. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- HUINCA, S. C. M.; ARAKI, H.; CAVALHEIRO, A. C. Correção geométrica de imagens Quickbird para áreas urbanas utilizando modelos geométricos generalizados e dados de laser scanning. In: *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais*. Goiânia, Brasil: INPE, vol. 12, pp. 4545-4551, 2005.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.html>>. Acesso em: 14 mar. 2005a.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33 (1), pp. 159-174, March 1977.
- MOREIRA, S. J. M.; GUIMARÃES, A. G.; DINIZ, A. D. Estudos dos impactos ambientais causados pelo uso e ocupação do solo no Bairro Belvedere III. In: *X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Anais*. Rio de Janeiro: UFRJ, v. 1, pp. 823-830, set. 2003.
- PCI GEOMATICS. Sensor Models [online]. Disponível em: <[http://www.pcigeomatics.com/pdfs/g9\\_sensor\\_models.pdf](http://www.pcigeomatics.com/pdfs/g9_sensor_models.pdf)>. Acesso em: July 2005.

- SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINEL, L. M.; ROMANO, A. W.; VIANA, C. S. *Estudos geológicos, hidrogeológicos e geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, MG: Secretaria Municipal de Planejamento, 1995.
- \_\_\_\_\_. Mapa Geológico de Belo Horizonte, Belo Horizonte, MG, PBH, 1995. (Escala 1:25.000).
- SILVA, W. B.; VERGARA, O. R. Avaliação da qualidade geométrica de imagens IKONOS ortoretificadas utilizando-se a transformação polinomial racional. In: XII *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais*. Brasil, Goiânia, INPE, 2005, v. 12, pp. 2581-2588.
- TAO, C. V.; HU, Y. 3D Reconstruction Methods based on the Rational Function Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 68 (7), pp. 705-714, July 2002.
- THOMAS, N.; HENDRIX, C.; CONGALTON, R.G. A comparison of Urban Mapping Methods using High-Resolution Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 69 (9), pp. 963-972, 2003.
- TOUTIN, T. Review Article: Geometric processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25 (10), pp. 1893-1924, May 2004.
- YANG, X.; Remote Sensing and GIS for Urban Analysis: An Introduction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 69 (9), pp. 937-939, Sept. 2003.

## Estudos de Qualidade e Aplicações Práticas de Dados de Scanner com Altíssima Resolução

Matthias Möller

### Resumo

Sistemas sensores do tipo scanner – imageadores digitais e multispectrais de altíssima resolução – são um desenvolvimento relativamente novo. Eles obtêm dados de imagem com uma resolução no terreno até hoje não alcançada, superior a 0,1 m, e precisão geométrica de posicionamento, superior a aquelas das ortofotos, derivadas de fotografias aéreas convencionais. As áreas de aplicação dessas imagens de scanner são muito amplas e ainda não foram totalmente exploradas. Este trabalho contém na sua primeira parte uma descrição da técnica e do funcionamento de scanners de linha aerotransportados, seguida por uma análise qualitativa desses dados de imagem de altíssima resolução. Na terceira parte há uma visão de conjunto das áreas de aplicação acessadas até agora com estes dados de imagem.

### 21.1 Da Fotografia Aérea à Imagem Digital do Scanner

Imagens fotográficas aéreas já vêm sendo usadas há aproximadamente 60 anos, para documentar a condição da Terra em grande escala e com uma elevada resolução espacial. Assim fotografias aéreas analógicas são um meio comprovado para a detecção da superfície terrestre, especialmente porque refletem objetivamente as condições da superfície da Terra, isto é, não são nem manipuladas, nem o seu conteúdo é falsificado por uma interpretação. Para projetos de planejamento analógicos em grandes escalas, por exemplo em áreas urbanas, baseadas em cartas topográficas impressas, a utilização de fotografias aéreas para verificação/controle do *status* atual é rotineira.

Atualmente, no entanto, aumenta cada vez mais o volume de dados digitais básicos, sob forma de mapas cadastrais e mapas de uso do solo digitais, como o ALK (*Automatisierte Liegenschaftskarte*) (mapa cadastral automatizado) e ATKIS (*Amtliches Topographisches Kartographisches Informationssystem*) (sistema de informações topográfico-cartográfico oficial), como base para os processos de planejamento num ambiente computacional. Futuramente essa tendência será reforçada, também pela continuidade de sistemas de cartas até agora analógicas como, p. ex., o DGK (*Digitale Grundkarte*) (mapa básico digital) em 1:5.000, como DTK (*Digitale Topographische Karte*) (mapa topográfico digital) na Alemanha. Esses mapas então são processados digitalmente pelo usuário com programas apropriados como CAD (*Computer-Aided Design*) e/ou SIG (sistemas de informação geográfica). Para planejamentos futuros é desejável dispor de uma base de imagens digitais, como informação fundamental, que contenha pelo menos aquelas informações obtidas de fotografias aéreas, mas que além disso se ajustem geometricamente com

precisão a outras bases de dados. Tais imagens são fornecidas, a partir do ano 2000, por scanners digitais aerotransportados multiespectrais de altíssima resolução.

Uma primeira campanha de imageamento sob condições quase operacionais pôde ser realizada sobre a cidade de Osnabrück com o scanner HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera-Airborne*). Este artigo trata inicialmente da técnica de funcionamento deste scanner representando todos os scanners em linha com ótica CCD, apresentando, em seguida, os produtos de imageamento. Na segunda parte os dados de imagem registrados e processados são submetidos a uma avaliação qualitativa e na terceira parte são apresentadas aplicações práticas operacionais baseadas em dados do HRSC-A.

## 21.2 A Técnica, a Classificação Sistemática de Scanners Digitais e a Tomada de Imagens

### 21.2.1 Desenvolvimentos atuais de scanners digitais aerotransportados

O primeiro modelo deste tipo de scanner, dentre toda uma série de novos sistemas imageadores, é representado pelo HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera – Airborne*), desenvolvido pela DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) (Agência Espacial Alemã) em Berlin-Adlershof. Na concepção original, o sensor, montado numa espaçonave, deveria monitorar o planeta Marte em 1996 (Neukum et al., 1996). Após o insucesso da missão, um modelo idêntico foi montado num avião e aos poucos aperfeiçoado para uma nova aplicação. No ano de 2003 um modelo similar foi enviado para o planeta Marte e assim executou a sua missão originalmente prevista.

O HRSC-A foi continuamente desenvolvido para o tipo HRSC-AX (X designa *extended*). Em paralelo com o HRSC-A, a DLR em Berlin-Adlershof, sob contrato com a LH-Systems (*Leica-Helava*), construiu um outro scanner digital, o ADS 40 (*Aerial Digital Scanner*), que em 2001 ficou pronto para a construção em série, e que atualmente é utilizado no Japão (Eckardt et al., 2000). Um terceiro desenvolvimento é representado pela DMC 2001 (*Digital Metric Camera*) da Firma ZI (*Zeiss Imaging*). Ao contrário da câmara da DLR, o DMC é um scanner matricial, que atualmente ainda se encontra na fase experimental. A firma VEXCEL desenvolveu um scanner matricial, o *Ultracam* (Tab. 21.1).

Outros scanners digitais no segmento de baixo custo também estão disponíveis, porém não são adequados para o mapeamento em grandes escalas, tanto no que se refere à resolução no solo quanto à resolução espectral, de áreas extremamente detalhadas e altamente variáveis, tal como as regiões urbanas.

### 21.2.2 Técnica e produtos de imagem do HRSC-A

O HRSC-A foi construído a partir de 9 linhas de CCDs (*Charged Coupled Devices*) paralelas entre si, com 5.184 elementos por linha e que estão dispostos em diferentes ângulos para frente, para baixo e para trás e assim sendo pode fazer tomadas nestas direções. Por meio da disposição do ângulo de 18,9° (paralelo à linha de voo) e usando um software fotogramétrico, pode ser calculado um MDT (modelo digital de terreno).

Por meio dos diferentes modos de tomada da imagem, o registro sincrônico de 4 canais espectrais e de um canal pancromático é possível (Fig. 21.1). Os canais individuais são

**Tab. 21.1** Sistemas scanner imageadores aerotransportados com altíssima resolução

DESIGNAÇÃO	HRSC-A	HRSC-AX	AD840	ULTRACAM D	DMC
Construtor	DLR	DLR	DLR/Leica-Geosystems	Vexcel	Zi-Imaging
Linha/Matriz	Linha	Linha	Linha	Matriz	Matriz
Nº dos elementos de varredura	5184	12172	12000	11500 * 7500 (pan)	7880 * 13824 (pan)
Canais	Ve, Vd, Az, Irv	Ve, Vd, Az, Irv	Ve, Vd, Az, Irv	Ve, Vd, Az, Irv	Ve, Vd, Az, Irv
Ângulo de abertura	11,9	28,9	64	65 (cr. track) 46 (al. track)	69,3 (cr. track) 42 (al. track)
Resolução radial	8 bit	12 bit	12 bit	12 bit	12 bit
WWW	<a href="http://solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml">Solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml</a>	<a href="http://solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml">Solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml</a>	<a href="http://www.gis.leica-geosystems.com/products/hrsc/AD840_Broschure.pdf">www.gis.leica-geosystems.com/products/hrsc/AD840_Broschure.pdf</a>	<a href="http://www.vexcel.at">www.vexcel.at</a>	<a href="http://www.ziimaging.com/productPages/dmc.htm">WWW.ziimaging.com/productPages/dmc.htm</a>
Legenda: Ve = Vermelho, Vd = Verde, Az = Azul, Irv = Infravermelho cr. track = cross track, perpendicular à linha de voo al. track = along track, paralelo à linha de voo					

registrados com uma resolução radiométrica de 10 bits e recalculados para 8 bits durante o processamento.

Além do registro de 450 linhas por segundo (450 Hz), é efetuado por meio de um POS/DG (*Position and Orientation for Direct Georeferencing*), que é um acoplamento entre DGPS/INS (*Differential Global Positioning System/Inertial Navigation System*) do fabricante canadense Applanix (<http://applanix.com>) com uma frequência de 200 Hz, registram-se os parâmetros atuais da posição do avião e a sua velocidade. Assim é possível o georreferenciamento absoluto de aproximadamente cada segunda linha da imagem registrada, sendo que os pontos de imagem que se encontram no meio das duas linhas podem ser interpolados. Com esses dados é possível executar, no decorrer do processamento, um georreferenciamento de altíssima precisão dos pontos individuais. Os produtos finais são ortofotos com elevada precisão geométrica da posição. O erro é de aproximadamente  $\pm 1$  pixel nas direções X, Y e Z (Wewel et al., 1998).

A resolução real no terreno, numa altitude de voo de aproximadamente 3.000 m sobre o solo, é de 0,12 m no canal pancromático, enquanto que os canais espectrais são registrados com uma resolução quatro vezes inferior (0,24 x 0,24 m) (Hoffmann, 2001). Durante o processamento dos dados brutos, os dados pancromáticos são reamostrados para um tamanho de 0,15 m e os multiespectrais ao tamanho dos pixels pancromáticos. Devido à resolução inferior, as imagens multiespectrais parecem estar muito mais desfocadas (Fig. 21.2).

Considerando que no caso do HRSC-A se trata de um scanner em linha, o imageamento é feito faixa por faixa. Cada linha de imagem possui no solo uma largura efetiva de 622 m (0,12 m x 5184), em relação a uma altitude de voo de 3.000 m sobre o solo. O ângulo de abertura muito pequeno de 11,8° (perpendicular à linha de voo) é o responsável por essa faixa de imageamento relativamente estreita. Por outro lado, em função desse ângulo de abertura pequeno, nas imagens do HRSC-A não ocorrem efeitos de inclinações, devidos a distorções de perspectiva, tal como se observa em fotografias aéreas analógicas, próximo às suas bordas.

Devido à sobreposição de 30%, a largura da faixa imageada é reduzida efetivamente para 414 m. Resulta disso uma duração da missão mais longa ao imagear grandes territórios; por outro lado, o avião precisa ter grande estabilidade, para que as faixas sejam imageadas sem "buracos", ou seja, sem perdas de imagem devido a oscilações da plataforma.

Para imagear uma grande cidade como Osnabrück (Alemanha) com uma extensão N-S de aproximadamente 13 km, foram necessárias um total de 42 faixas de voo, sendo cada uma com 20 km de extensão, o que exigiu um período de 4 horas para a aquisição dos dados.

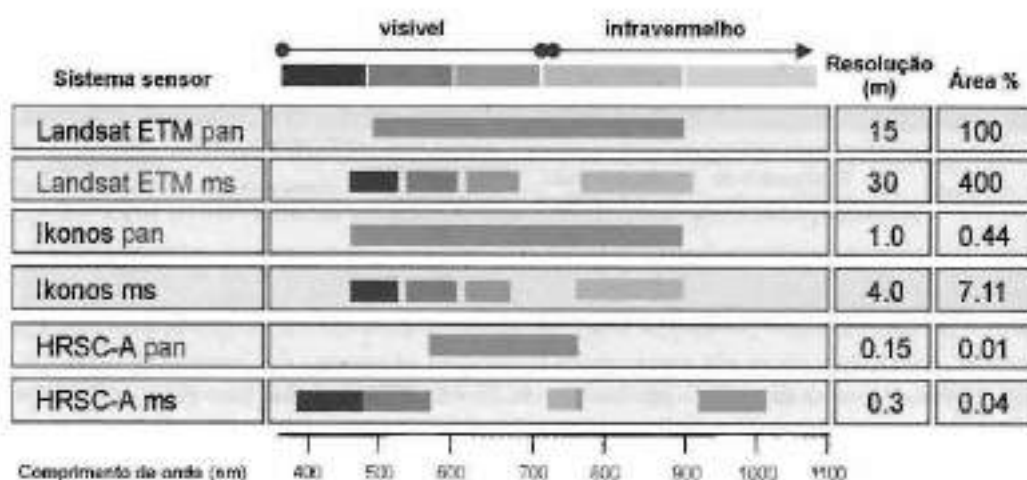


Fig. 21.1 Comparação entre características espectrais e geométricas de sensores opto-eletrônicos e cobertura areolar por pixel (Möller, 2001)

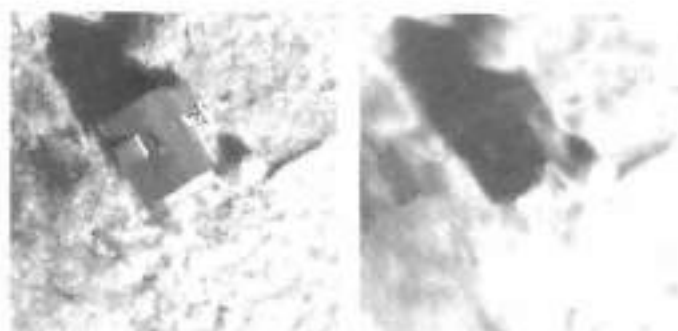


Fig. 21.2 Imagem pancromática (resolução 0,15 m, à esquerda) e imagem IV (resolução 0,3 m à direita)

### 21.3 Comparação Sistemática de Dados de Imagens de Scanners com Altíssima Resolução com Imagens de Outros Sistemas Sensores

Imagens geradas opto-eletronicamente e com resolução extremamente elevada, permitem um novo aumento de informações. O conteúdo da imagem é extremamente detalhado, o que

é desejável em regiões com uma grande variabilidade estrutural, como ocorre, p. ex., em áreas urbanas.

Se até recentemente as maiores resoluções geométricas eram de aproximadamente 6 m como os produtos de imagens *pan-sharpened* do IRS-1 (*Indian Remote Sensing Satellite*) para uma escala de trabalho de 1:15.000 (vide Zhang e Albertz, 1998), a partir do ano 2000 estão disponíveis imagens de muito alta resolução do satélite Ikonos (Tab. 21.1). A sua escala de trabalho está na faixa de aproximadamente 1:10.000 e com isto é adequada para uma observação de blocos de construção em áreas urbanas (Reder e Meinel, 2001).

As escalas na área de planejamento que chegam até 1:500, no momento são alcançadas somente por scanners aerotransportados, que fornecem, como produtos de imagem, ortofotos georreferenciados com exatidão.

Se até agora, no caso de sensores opto-eletrônicos, consideravam-se resoluções geométricas da ordem de 30 m (Landsat TM), fica claro, que a partir dos sensores disponíveis a partir do ano 2000, é alcançada uma nova dimensão em termos de dados de imagens, ou seja, precisa ser introduzida uma nova nomenclatura para a definição correta dos sistemas sensores. A Tab. 21.2 dá uma visão de conjunto sobre os sensores convencionais e introduz uma nova nomenclatura para a designação destes produtos de imagens.

Tab. 21.2 Nomenclatura e escala de aplicação de dados de sensoriamento remoto

Resolução (m)	Designação	Sistema sensor	Escala de trabalho
0,1 - 0,5	Altíssima resolução	Aerotransportado: HRSC-A	1.500 - 1:5.000
> 0,5 - 1,0	Muito alta resolução	Satélite: Ikonos (panorâmico)	1:10.000
4,0	Alta resolução	Satélite: Ikonos (multiespectral)	1:15.000
> 4,0	Alta resolução	Aerotransportado: Daedalus	1:15.000
> 4,0 - 12	Média resolução	Satélite: IRS (panorâmico)	1:25.000
> 12 - 50	Baixa resolução	Satélites: IRS (multiespectral), Landsat ETM (panorâmico + multiespectral)	1:100.000
> 50 - 250	Muito baixa resolução	Satélite: Landsat MSS	1:500.000
> 250	Resolução extremamente baixa	Satélites: NOAA, Meteosat	> 1.500.000

Fonte: NEER (1999) modificado.

## 21.4 Registro de Dados de Imagem

No ano de 1999, em dois projetos do Instituto de Ciências Ambientais (IUW), foram tomadas imagens com o scanner digital HRSC-A (Möller, 2000; Möller et al., 2001). As motivações para realizar estas campanhas de imageamento por avião foram diferentes. A área urbana da cidade de Osnabrück foi imageada em abril de 1999 (início do período vegetativo após o inverno europeu), para permitir uma excelente visão do solo urbano. O imageamento inicialmente foi considerado uma medida substitutiva a um imageamento com uma câmara métrica (RMK) convencional.

No período de maior cobertura vegetal com juncos, em setembro de 1999, foram imageadas três seções do baixo curso do rio Elbe, próximo a Hamburgo. Com base nesses dados



deveriam ser desenvolvidos métodos automáticos que permitissem definir, com grande precisão, os biótipos próximos à margem do rio, a partir dos dados multispectrais deste scanner.

Para o imageamento de ambas as áreas foi selecionado o scanner HRSC-A, visto que, na época, nenhum outro tipo de scanner estava disponível. Os dados brutos do HRSC-A de ambas as missões foram processados fotogrametricamente pelo DLR em Adlershof e posteriormente fornecidos ao Instituto de Ciências Ambientais, por canal, em CD, DVD ou DLT no formato \*.img da Erdas Imagine. As imagens processadas da cidade de Osnabrück foram reamostradas a um tamanho de *pixel* de 0,16 m (multispectral e pancromático), ou seja, a 0,5 m (MDT), e cortadas em quadrados de 1 x 1 km<sup>2</sup> cuja cobertura e denominação estão em conformidade com o mapa cadastral.

Os dados de imagem da área-teste no rio Elbe foram oferecidos no tamanho de 0,15 m (multispectral e pancromático) e 0,5 m para o MDT.

## 21.5 A Qualidade de Dados de Scanners Digitais

### 21.5.1 Características geométricas

Com uma resolução no solo de 0,15 m e uma precisão geométrica de posição de  $\pm 0,15$  m (Wewel et al., 1998) o HRSC-A é atualmente o sistema qualitativamente mais avançado dentre todos os sistemas opto-eletrônicos disponíveis. Na prática, as exatidões de posições geométricas dessas imagens foram testadas, usando-se o cadastro das tampas de galerias pluviais da cidade de Osnabrück (Tab. 21.3). Utilizaram-se estas tampas como pontos de controle, visto que podiam ser geralmente bem identificadas com os dados de imagem de alta resolução, quando não estavam cobertas por outros objetos. Nesse caso, de 10 pontos de comparação puderam ser identificados 6 nas imagens e 4 estavam parcialmente cobertos por sombras de objetos próximos. É apresentado neste trabalho um método para a extração dos setores de sombra e procedimentos especiais para a otimização de imagem.

Tab. 21.3 Desvios de pontos de controle (tampas de bueiros) na cidade de Osnabrück

Pontos de controle	Bairro	Diferença em X [cm]	Diferença em Y [cm]	Diferença em Z [cm]
1	Lustnagen	—	—	14
2	Centro	13	10	4
3	Voxtrup	—	—	16
4	Sulthausen	26	21	29
5	Hellem	13	25	82
6	Alter	19	6	65
7	Haste	—	—	350
8	Schinkel	15	17	6
9	Pya	0	15	127
10	Centro	—	—	6
$\Sigma$		14,3	16,6	65,3

— Tampa de canalização não reconhecível nas imagens; altitude do voo: aprox. 3.000 m  
Resolução no solo: 0,16 m em X, Y para o canal pancromático em nadir e 0,5 em Z.



**Fig. 21.3** Recorte do MDT, quadrícula 3496. As setas indicam os dados processados erroneamente no setor de sobreposição dos dados de duas faixas imageadas. O ponto branco indica a posição do ponto de controle nº 7

O cadastro de rampas de canal foi medido pelo Serviço de Geodésia Municipal por meio de triangulação terrestre e partindo de pontos trigonométricos (TPs), que são usados como pontos de referência absolutos na administração do cadastro. Observou-se que os desvios em  $x$  e  $y$  correspondem, em média, às indicações dos desenvolvedores da câmara (Wewel et al., 1998), enquanto a altitude, em média, encontra-se fora da precisão mencionada. Os desvios em  $x$  são devidos especialmente ao ponto de controle nº 7. Durante o controle visual do MDT apareceu aqui um erro de processamento (vide Fig. 21.3).

Pesquisas por Haala et al. (2000) encontraram desvios nitidamente inferiores em  $x$  e  $y$  do que os indicados pelo fabricante. O mesmo estudo mostrou também que os métodos de correção fotogramétricos

convencionais, em relação à correção com dados de DGPS/INS, não resultaram em melhorias de precisão dos pontos, mas que, os dados do POS/DG garantem o georreferenciamento qualitativamente melhor.

### 21.5.2 Características espectrais

A largura da faixa espectral abrangida pelo HRSC-A alcança do azul até o infravermelho próximo do espectro eletromagnético e inclui assim as características de imagem nas cores naturais e infravermelho falsa-cor. A deficiência maior é a falta do sinal vermelho do HRSC-A na análise da vegetação. Através da razão infravermelho/vermelho e considerando índices especiais, pode-se discriminar vegetação com vida de objetos sem vida, de modo bastante preciso e reproduzível (*red edge*, vide Sabins, 1996). Numa nova variante do scanner, o HRSC-AX, que é usado desde 2001, há um canal vermelho, sendo que para tanto, o canal do infravermelho muito próximo está equipado com um outro filtro (vide Tab. 21.1).

Durante o processamento fotogramétrico, os histogramas das faixas de vôo são ajustados radiometricamente entre si, para equilibrar oscilações do nível de cinza, que ocorrem quase que obrigatoriamente, p. ex.: devido à direção do vôo, posição da aeronave, e altura solar. No caso ideal, o resultado é uma imagem homogênea de níveis de cinza, que apresenta para os mesmos objetos também níveis de cinza idênticos. Na realidade, nas faixas vizinhas de imagens do HRSC-A, há às vezes grandes saltos de níveis de cinza (Fig. 21.4) em objetos bastante homogêneos. Esses erros de imagem tornam muito difícil, até impossível, uma interpretação estatística no âmbito de uma análise multiespectral, somente considerando os níveis de cinza.



Fig. 21.4 Salto de nível de cinza no meio da imagem



Fig. 21.5 Informação faltante

Outro problema é representado pelos “buracos” nos dados de imagem (Fig. 21.5), ou seja, locais onde não há informação da imagem. Estes “buracos” provavelmente são devidos a pontos de turbulência e por isso constituem oscilações da aeronave durante o imageamento. Esses buracos não deverão ocorrer mais com o novo sistema HRSC-AX, visto que o ângulo de abertura é maior e, com isto, a faixa imageada é mais larga. Os problemas da elevada resolução espectral (espectro do visível até infravermelho próximo) levam indiretamente à escolha da melhor data de imageamento com um scanner digital. Em princípio, as áreas urbanas são imageadas em diferentes épocas ao longo do ano, com filmes de diferentes sensibilidades espectrais, para a detecção de diferentes tipos de objetos na superfície da Terra. Um período de imageamento é via de regra o início do ano, antes da expansão da vegetação (folhas), porém não antes de meados do mês de março, para assegurar uma boa iluminação e pouco sombreamento. O material de imageamento usado é via de regra um filme colorido de cores naturais (p. ex., Kodak Aerocolor 2444). Assim obtém-se uma visão praticamente livre do solo, mesmo debaixo de árvores. Estes dados são demandados pelos segmentos de geodésia e cadastro. Contrastando com isto, os imageamentos com filmes infravermelhos coloridos (p. ex., Kodak 1443 ou 2443) são executados num período bem mais tardio durante o ano, quando a vegetação está totalmente coberta com folhas. Estes

imageamentos servem assim especialmente à análise da vegetação (preparo de um cadastro de árvores, gerenciamento de áreas verdes, etc.).

### 21.5.3 Características radiométricas

A resolução radiométrica dos dados do scanner HRSC-A é teoricamente de 256 níveis de cinza por canal. Histogramas nos diferentes canais porém não utilizam nem de longe o espectro disponível, mas possuem uma largura de banda de tipicamente de 100-140 níveis de cinza (Tab. 21.4).

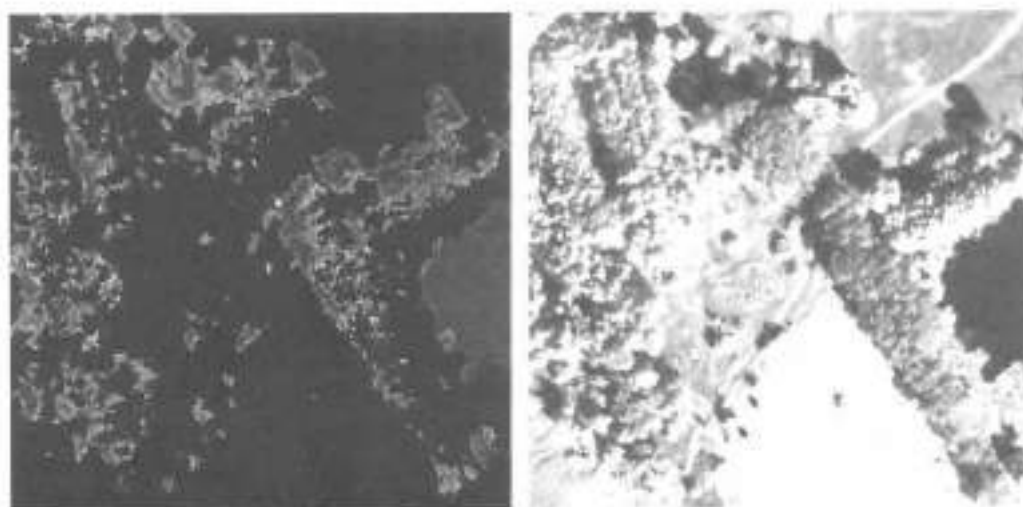
Apesar da largura relativamente estreita de banda, os scanners digitais levam nítidas vantagens sobre as fotografias analógicas, especialmente sobre fotografias infravermelhas coloridas, principalmente em regiões com problemas de iluminação, como p. ex. em setores sombreados. Fotografias infravermelhas coloridas (CIR) quase não têm informações utilizáveis nas sombras, sendo que uma imagem escaneada nos setores sombreados apresenta níveis de cinza extremamente baixos.

**Tab. 21.4** Informações estatísticas de uma seção do imageamento na ilha Pagensand

Canal	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Moda	Desvio padrão
Azul	28	107	40	40	40	8
Verde	11	117	30	30	30	10
Pancromático	5	124	35	38	20	15
IV próximo	4	129	37	38	6	24
Infravermelho	1	127	35	37	1	24

Durante a interpretação digital dos dados multiespectrais do HRSC-A é possível eliminar os setores sombreados com uma transformação IHS (intensidade/matiz/saturação, vide Albertz, 1991) dos canais infravermelho, verde e azul. Apresentamos aqui o exemplo dos dados de imagem da ilha Pagensand no rio Elbe (Fig. 21.6). As sombras estão contidas exclusivamente na componente *intensidade*. Estes setores podem ser trabalhados separadamente ou posteriormente, introduzidos no resultado da interpretação ou na imagem original (com realce de contraste).

Esse método só pode ser aplicado com sucesso em vegetação com comparativamente valores elevados de reflexão no infravermelho. Em setores de sombra de áreas urbanas, no entanto, como p. ex. os dados da cidade de Osnabrück, não podem ser extraídos desta forma e submetidos a uma otimização da imagem.



**Fig. 21.6** Vegetação elevada com sombras, ilha Pagensand rio Elbe. Esquerda: sombras eliminadas da componente *intensidade*; Direita: sombras da componente *intensidade*

## 21.6 Aplicações dos Dados de Scanner

Os usuários de dados de sensoriamento remoto, já faz tempo desejam dados de imagem que contenham:

- uma elevada resolução no terreno em paralelo com
- características de imagem multiespectrais e uma
- exatidão quanto à posição.

Todas estas exigências são satisfeitas com os dados digitais de scanners aerotransportados. Agora a preocupação é encontrar novos campos de aplicações para estas imagens e desta forma criar mercados e assim ajudar a tornar o seu uso operacional.

### 21.7 Exemplos de Aplicação Prática de Dados de Scanner com Resolução Extremamente Elevada

Em princípio é indicado considerar as imagens em comparação direta com as fotografias aéreas analógicas convencionais e utilizá-las principalmente também desta forma. Isso significa que na visualização, ou seja na informação rápida da situação atual no local, está o principal interesse. Como produto clássico deve-se mencionar aqui a orto-carta-imagem, que foi elaborada areolarmente da cidade de Berlim, com base nos dados de scanner HRSC-A (Hoffmann, 2001).

Para tornar acessíveis as imagens digitais a um grande número de usuários em pouco tempo, foi programada uma interface para a *www* e para o navegador *www*, através da qual todos os dados de imagem da cidade de Osnabrück, ordenados segundo um princípio hierárquico, podem ser carregados diretamente na mesa do computador. O usuário então tem as opções de olhar apenas os dados de imagem georreferenciados no navegador, ou arquivá-los no disco rígido local ou ainda carregá-los diretamente num software de SIG onde pode usá-los como base de dados. Através do software livremente disponível para navegar em conjuntos de dados SIG (p. ex., ArcExplorer da firma ESRI <http://www.esri.com>) podem ser colocados dados de imagens atrás de dados vetoriais muito abstratos e de difícil acesso semântico, permitindo uma melhor visualização. Todavia, os dados de imagem das campanhas de imageamento do HRSC-A, por meio desta apresentação no Sistema de Informação Ambiental Urbano, obtiveram uma grande difusão e aceitação na administração da cidade de Osnabrück.

A manutenção dos dados na rede *www* assegura, além disso, que os dados (futuramente) também estarão disponíveis e móveis. Eles podem ser usados como geodados básicos, diretamente no local de uma verificação e, com base neles, fazer a digitalização de feições num ambiente SIG.

Isso parece fazer muito sentido num mapeamento de tipos de biótopos no campo. Se até o momento foi usual realizarem-se esboços à mão nos mapas, transferi-los posteriormente e finalmente digitalizá-los no SIG, a simplificação e otimização usando dados de scanner é evidente. Os objetos a serem mapeados podem ser delimitados entre si bem mais precisamente, com base em dados de imagem disponíveis *online* e em conformidade com SIG, e já no campo podem ser arquivados com os atributos SIG correspondentes. Desta forma, a obtenção e a atualização dos dados disponíveis é possível com um volume de trabalho bem menor, em comparação com os registros convencionais.

### 21.8 Métodos da Interpretação Digital

Com relação ao tamanho da superfície por ponto de imagem, fica claro a partir da Fig. 21.1, que um *pixel* pancromático HRSC-A somente cobre 0,01% da superfície de um *pixel* do Landsat ETM canal pancromático. Isso significa que, para imagens de resolução espacial extremamente elevada, é possível distinguir muitos objetos, mas que por outro lado, as classes espectrais possuem uma variância muito maior para a descrição de objetos do que no Landsat ETM multiespectral.

Com relação às áreas urbanas, p. ex., a partir de imagens ETM é possível derivar, com precisão satisfatória, somente duas classes temáticas: alta densidade e baixa densidade de construções. A partir de imagens HRSC-A por outro lado, em áreas urbanas podem ser delimitados muitos objetos da utilização real. Além disso há os objetos que, em relação às suas características específicas de reflexão, são extremamente não homogêneos (p. ex., setores com sombras). Também assinaturas inequívocas, como os telhados de edifícios que com sinais de características praticamente iguais, freqüentemente não possuem as mesmas assinaturas espectrais. Se por um lado é possível delimitar precisamente na tela (*on-screen digitizing*) objetos isoladamente por meio de interpretação visual, o grande número de objetos que se encontram espectralmente próximos entre si, dificulta uma separação dentro de uma concepção de discriminação inequívoca e automática em classes de objetos. As concepções estatísticas clássicas de interpretação esgotam aqui rapidamente seus limites, caso forem aplicados, como de costume, à imagem.

Em virtude da complexidade dos dados de imagem, antes de se proceder a uma avaliação estatística, p. ex., usando uma concepção de classificação por máxima verossimilhança, precisa ser efetuada obrigatoriamente uma redução do conteúdo de imagem. Isto deverá ser executado por meio de índices ou de operações aritméticas antes da classificação propriamente dita. Esta abordagem foi desenvolvida para a detecção e modificação de biótipos e tornada operacional com sucesso (Möller et al., 2001).

Em áreas urbanas, com alta densidade populacional, especialmente nos centros das cidades fortemente impermeabilizados, estão sendo implantados programas para a melhoria da qualidade do ar. Uma parte desses programas é o fomento direcionado a telhados cobertos com vegetação. Para fazer o levantamento dos "telhados verdes" já existentes, por meio da formação de índices dos dados multiespectrais de scanner do HRSC-A, estes foram derivados e introduzidos num cadastro (vide Möller, 2001).

Um novo software de interpretação de imagens, que não segue a concepção clássica da análise estatística de probabilidades, porém que, antes da classificação, considera uma segmentação hierárquica do conteúdo de imagem, com base em características espectrais e na forma de objetos individuais, é altamente promissor para a interpretação automática de dados de imagem com altíssima resolução (Hoffmann e van der Weeg, 2001; Hofmann, 2001; Schiewe e Tufte, 2001). Para tanto, precisa ser otimizada unicamente a operacionalidade, relacionada à interpretação de grandes conjuntos de dados arcolares usando a metodologia baseada em segmentação.

## 21.9 Visualização

Além das imagens espectrais, podem ser usados os dados da avaliação altimétrica estereoscópica para a geração de novos produtos. Para a visualização estática tridimensional (em 3D), a produção de imagens em anaglifo é uma ótima indicação. Somente essas imagens fornecem uma impressão plástica do corpo urbano em toda a sua complexidade, até no detalhe.

Através da altimetria absoluta acima do nível médio do mar, a partir do MDE pode ser calculada a altitude de objetos na forma de um modelo digital de objetos (MDO) (Möller, 2003, vide também: <http://ces.asu.edu/MM/highres.htm>). Aqui o método foi aplicado a prédios e cada prédio recebeu a altitude a partir do solo. A produção de um MDT (modelo digital do terreno) a partir de um MDO foi comprovada e pode – com uma certa tolerância de erro – ser considerado como um produto derivado de dados digitais de scanner (Möller, 2000).

Com base num MDO, são possíveis modelagens em 3D extremamente detalhadas, num ambiente SIG. Assim, p. ex., a influência da densidade e tipo de construções sobre o fluxo de ar puro ao centro da cidade, pode ser visualizado de forma muito impressionante num SIG, de modo que uma avaliação da mudança qualitativa é possível para o cidadão não especializado, mas que é afetado diretamente pela construção (Fig. 21.7).



Fig. 21.7 Visualização de um fenômeno tridimensional na SIG, destacando uma corrente de ar puro, indicada pelas setas

### 21.10 Resumo e Perspectivas

Imagens digitais multiespectrais de altíssima resolução possuem um elevado potencial para aplicações em Ciências da Terra. Isto é devido especialmente à variedade dos produtos fornecidos; além das imagens multiespectrais também é gerado um modelo altimétrico. Um grande número de aplicações foi desenvolvido em parte até a operacionalidade, especialmente *online*, sendo um bom exemplo a disponibilidade das imagens que garante o seu uso diário por um grande número de usuários. Quando se pretende avaliar a qualidade das imagens digitais de scanner, procura-se compará-las com fotografias aéreas convencionais. Produtos derivados de imagens de scanner HRSC-A, podem ser analisados mais rapidamente e em maior profundidade e de forma muito mais barata do que fotografias aéreas.

A qualidade geométrica desses novos conjuntos de dados até o momento não foi alcançada pelos procedimentos fotogramétricos analógicos, sendo que apenas o ajuste dos histogramas dos canais espectrais entre si, nas faixas de vôo, precisa ainda ser otimizado.

Em breve, na faixa de escalas de 1:500 a 1:5.000 será imprescindível a utilização de scanners digitais multiespectrais. O preço de uma campanha de imageamento com scanner – que está na faixa de 150-350 Euros/km<sup>2</sup> e portanto está mais caro por um fator de 10 sobre o preço de uma campanha de vôo com fotografias aéreas infravermelhas convencionais – precisa cair muito ainda. Para tanto, desempenharão um importante papel o aumento da demanda, o constante aumento do mercado, um grande número de scanners digitais que estarão disponíveis em breve e a situação de concorrência decorrente.

### 21.11 Agradecimentos

Pelo bom trabalho conjunto, pela ajuda na obtenção de dados e pela disponibilidade de dados para projetos de pesquisa, agradecemos à cidade de Osnabrück, especificamente ao

Sr. Heit e ao Sr. Schneiders. À Agência Federal de Águas, ao Sr. Liebenstein e ao Sr. Schröder somos igualmente gratos por tornar disponíveis os dados do scanner HRSC-A do imageamento no rio Elbe em 1999.

### 21.12 Referências Bibliográficas

- ALBERTZ, J. *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1991.
- ECKARDT, A.; BRAUNECKER, B.; SANDAU, R. Performance of the imaging system in the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. *IAPRS*, Amsterdam, v. 33, part B1, comm. 1, pp. 104-109, 2000.
- HAALA, N.; FRITSCH, D.; STALLMANN, D.; CRAMER, M. On the Performance of Digital Airborne Pushbroom Cameras for Photogrammetric Data Processing – a Case Study. *Geo-Information-Systeme*, Wichmann, Karlsruhe, v. 13, 4/2000, pp. 29-35, 2000.
- HOFFMANN, A. *Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr hochauflösenden Daten: Methoden der Segmentierung, der hierarchischen Klassifizierung und der per-Parcel-Methode mit Daten der Digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit für die Aktualisierung topographischer Karten*. Dissertation an der Humboldt Universität Berlin, 2001.
- HOFFMANN, A.; van der WEGT, W. New Sensor Systems and new Classification Methods: Laser and Digital Camera-data meet object-oriented strategies. *Geo-Information-Systeme*, Wichmann, Heidelberg, v. 14, 6/2001, pp. 18-23, 2001.
- HOFMANN, P. Detection of buildings and roads from Ikonos data using additional elevation information. *Geo-Information-Systeme*, v. 14, 6/2001, pp. 28-33, 2001.
- MÖLLER, M. New applications of very high resolution digital airborne scanner data. *IAPRS*, Amsterdam, v. 33, B4/2, comm. IV, pp. 663-669, 2000.
- MÖLLER, M. Extremely High Resolution Airborne Scanner Data for Urban Environmental Monitoring. In: JÜRGENS, C. (Hrsg.) *Remote Sensing of Urban Areas, Regensburger Geographische Schriften*, nr. 35, on supplement CD, p. 337-345, 2001.
- MÖLLER, M. Urbanes Umweltmonitoring mit digitalen Flugzeugscannerdaten. Wichmann, Heidelberg, 2003.
- MÖLLER, M.; EHLERS, M.; GÄHLER, M.; JANOWSKY, R.; TCHEREPANOV, L. Entwicklung einer Methode zum automatisierten Biotopmonitoring auf der Grundlage von HRSC-A-Scannerdaten. *Naturschutz und Fernerkundung*, BfN-Skripten 42, Bonn, pp. 95-102, 2001.
- NEER, T. J. High Resolution Earth Imaging From Space: A Commercial Perspective on a Changing Landscape. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 32, Vienna, Austria, pp. 132-143, 1999.
- NEUKUM, G.; SCHWARZ, G.; FLOHRER, J.; SEBASTIAN, I.; JAUMANN, R.; HOFFMANN, H.; CARSENTY, U.; EICHENTOPF, K.; FISCHER, R. The Multiple Line Scanner Camera Experiment for the Russian Mars 96 Mission: Status Report and Prospects for the Future. In: FRITSCH, D.; HOBBIE, D. (Ed.) *Photogrammetric Week '95*, Wichmann, Karlsruhe, pp. 45-61, 1995.
- REDER, J.; MEINEL, G. Ikonos-Satellitenbilddaten – ein erster Erfahrungsbericht. *Kartographische Nachrichten*, Kirschbaum, Bonn, v. 51, 1/2001, pp. 40-46, 2001.



- SABINS, F. F. *Remote sensing, principles and interpretation*. 3. ed. New York: Freeman, 1996.
- STEFANOV, W. L.; RAMSEY, M. S.; CHRISTENSEN, P. R. Monitoring urban land cover change: an expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, v. 77, pp. 173-185, 2001.
- SCHIEWE, J.; TUFTE, L. Potenzial regionen-basierter Verfahren für die Integrative Auswertung von GIS- und Fernerkundungsdaten. In: BLASCHKE, T. (Hrsg.) *Fernerkundung und GIS: neue Sensoren – innovative Methoden*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.
- WEWEL, F.; SCHOLIEN, F.; NEUKUM, G.; ALBERTZ, J. *Digitale Luftbilddaufnahme mit der HRSC – ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie*. In: PFG, heft 6/1998, pp. 337-348, 1998.
- ZHANG, Y.; ALBERTZ, J. *Vergleich verschiedener Verfahren zur Kombination multi-sensoraler Satelliten-Bilddaten*. In: PFG, heft 5/1998, pp. 261-274, 1998.

Páginas na Internet:

<http://ces.asu.edu/MM/highres.htm>

Descrição da técnica e produtos de dados de scanners com altíssima resolução

<http://www.fzg.uni-vechra.de/mm/os/>

Demonstração da distribuição de dados de imagem online

[solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml](http://solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml)

Descrição dos scanners HRSC-A e HRSC-AX

[www.gis.leica-geosystems.com/products/files/ADS40\\_Brochure.pdf](http://www.gis.leica-geosystems.com/products/files/ADS40_Brochure.pdf)

Descrição do scanner ADS-40

[www.vexcel.at](http://www.vexcel.at)

Descrição do scanner Ultracam

[ww2.ziimaging.com/productPages/dmc.htm](http://ww2.ziimaging.com/productPages/dmc.htm)

Descrição do scanner DMC

[www.esri.com](http://www.esri.com)

Download do GIS Arcexplorer, software livre.

## Análise Orientada a Objetos de Dados de Sensoriamento Remoto para a Obtenção de Parâmetros Aquáticos/Terrestres<sup>1</sup>

Thorsten Andresen, Claudius Mott, Ralf Schüpferling, Stefan Zimmermann e Thomas Schneider

### 22.1 Introdução

Os modernos satélites de observação da Terra da geração do Ikonos fornecem dados de imagem de elevada resolução espacial, comparáveis a fotografias aéreas e fornecem além disso, informação espectral até a faixa do infravermelho próximo.

Com ajuda destes dados e no âmbito do Projeto Aquatic, está sendo desenvolvido um sistema de monitoramento que permita obter contínua e detalhadamente parâmetros do setor aquático e daquele junto às margens de lagoas e de suas áreas de captação.

O objetivo deste trabalho é, com ajuda de um procedimento orientado a objeto, classificar automaticamente os dados disponíveis (Ikonos, fotos aéreas, scanner Casi). A partir disso, pretende-se desenvolver um procedimento de interpretação operacional.

Este sistema de monitoramento deve ser utilizado por órgãos administrativos e de planejamento no nível de governos estaduais, para permitir um conhecimento atualizado das condições de uso do solo e dos corpos d'água, contribuindo assim para as tomadas de decisão nas seqüências de trabalhos de planejamento.

O método aqui apresentado para o monitoramento dos estandes de junco nos lagos da Baviera é um passo importante para o contínuo controle da qualidade das águas.

### 22.2 A Área de Estudos

A área de estudos encontra-se aproximadamente 40 km ao sul de Munique, na região pré-alpina da Alta Baviera e inclui o lago Starnberg e os lagos ao sul, conhecidos como "Osterseen". Trata-se de uma das mais importantes áreas de lazer da região de Munique. Partes do lago Starnberg e a maior parte dos "Osterseen" são áreas de proteção à natureza. A área-teste para esta pesquisa de monitoramento dos estandes de junco, limita-se no momento a uma seção junto à margem sul do lago Starnberg, próximo a St. Heinrich (Fig. 22.1).

---

<sup>1</sup> Projeto Aquatic: fomentado pelo Ministério Federal de Cultura e Pesquisa (BMBF), por meio da DLR: Projeto N° 50 EE 0040 & 50 EE 0041. <http://www.limno.biologie.tu-muenchen.de/forschung/projekte/aquatic/aquatic.html>



Fig. 22.1 Área do projeto

O desenvolvimento morfológico do lago Starnberg até hoje é discutido de forma controversa. A teoria mais conclusiva (Munthe citado em Rothpletz, 1917) diz que o lago Starnberg foi formado por erosão glacial da geleira Isar-Loisach, durante a glaciação de Würm, através de rios de degelo subglacial. Os *Osterseen* constituem uma cadeia de 19 lagos de "gelo morto", que se formaram na fase de regressão da geleira Isar-Loisach. O lago Starnberg, no final da última glaciação, foi cortado de seu principal afluente, o rio Loisach, e por isso é o único lago pré-alpino sem afluentes diretos dos Alpes. Esse é o motivo porque o lago Starnberg e os lagos *Osterseen* receberam uma baixa entrada de sedimentos. É uma das mais importantes premissas para a manutenção dessa cadeia de lagos.

### 22.2.1 Cordão de juncos nos lagos da Baviera Superior

No final do século 19, ao longo de todas as margens do lago Starnberg, havia extensos estandes de junco (*Phragmites australis*). Atualmente, populações maiores encontram-se tão-somente ao sul de Sankt Heinrich e na margem ocidental. Devido à ação mais forte do vento, na margem oriental do lago Starnberg há somente poucos estandes de junco, tratando-se, provavelmente, de junco terrestre ou de transição (Grosser et al., 1997).

Uma nítida diminuição dos estandes de junco na margem ocidental do lago Starnberg e na proximidade da ilha Rosen, foi descrita pela primeira vez em 1974 por Köhling e em 1975 por Goslich. Pesquisas dos anos 1980 (Meizer, Hermann, 1980) também indicaram uma diminuição do junco na orla do lago Starnberg. Relatou-se também o desaparecimento do junco na margem NW, entre as cidades de Starnberg e Possenhofen. A perda total dos estandes de junco nos últimos 50 anos é de 90% no lago Starnberg (Grosser et al., 1993).

### 22.2.2 A problemática da regressão do junco

Nas últimas décadas verificou-se uma significativa diminuição das populações de junco nos lagos de água doce europeus (Ostendorp, 1990). Estudos na Baviera mostraram que, apesar de uma nítida melhoria da qualidade d'água, continuam regredindo os estandes de junco (Grosser et al., 1993). A regressão do junco nos lagos da Baviera Superior é essencialmente um problema dos estandes de junco aquáticos.

É necessário diferenciar três formas de juncos, a saber: o aquático, o terrestre e a forma de transição. Esses tipos de junco não se diferenciam no seu fenótipo, apresentam porém exigências ecológicas diferentes quanto ao seu local-típico. O junco aquático cresce parcialmente sob a água e se diferencia de juncos terrestres e de transição por apresentar talos pequenos e densos. Por isso, há uma transição perceptível entre as formas de junco.

Uma lenta diminuição do junco se apresenta numa regressão mais ou menos nítida do limite externo do junco aquático, formação de setores sem juncos (os *Bulten*), estandes com menor densidade e diminuição do comprimento dos talos (van der Putten, 1997).

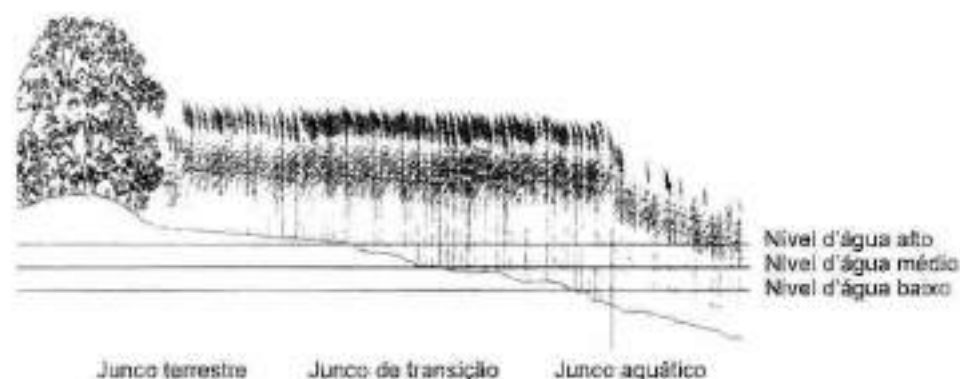


Fig. 22.2 As diferentes formas de junco (cf. Grosser et al., 1997)



Fig. 22.3 Estágios de dissolução de um estande de junco: 1) estande de junco aberto, 2) formação de setas sem junco, 3) junco destruído (Iseli e Imhof, 1989)

A construção de obras nas margens resulta num imediato e completo desaparecimento de estandes de juncos.

As causas da regressão do junco são via de regra as frequentes ocorrências de inundações (Ostendorp, 1991). Após este primeiro dano, os pássaros que bicam e a intensa utilização pelo homem levam a mais uma diminuição. Obras civis nas margens, destruição mecânica por ondas, objetos deixados na água bem como eutrofização e poluição hídrica são outras causas de diminuição do junco (Ostendorp, 1990).

Cinturões de junco intactos servem como espaço de vida para diversos tipos de animais, protegem contra a erosão das margens e mantêm a limpeza d'água (Ostendorp, 1993). Devido a essas funções, um retrocesso importante dos estandes de juncos leva a uma série de conseqüências, como: aumento de erosão nas margens de lagoas, perda de locais de nidificação e de espaços de vida para pássaros aquáticos, diminuição dos tipos de peixes comestíveis e redução da capacidade de autodepuração das águas.

Em razão da importância ecológica de cinturões de junco intactos, medidas de proteção e observação da sua expansão são extremamente necessárias. Informações atualizadas e detalhadas sobre o estado ecológico do junco são um pré-requisito para o seu monitoramento eficiente e ações de planejamento nos setores das margens. Modernos sistemas de sensoriamento remoto podem fornecer uma parte dessas informações.

### 22.3 Concepção de Monitoramento

Espera-se que os dados de sensoriamento remoto de alta resolução sejam mais adequados para detectar as diferentes fases de regressão do junco. A classificação orientada a objeto é uma concepção para a interpretação de dados de sensoriamento remoto e deve contribuir para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da vegetação das margens, especialmente dos estandes de junco, e uso do solo nos lagos da Baviera Superior.

A principal tarefa deste projeto é o desenvolvimento, aplicação e verificação de um sistema de regras básico e aplicável, para a classificação de diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto em vários tempos de tomada de dados. Uma primeira concepção é o estabelecimento de listas de objetos, com base nos requerimentos da diretiva FFH (Fauna, Flora, Habitat) e da Diretiva de Águas da União Europeia. Essa lista de objetos precisa ser retrabalhada com base nos dados de sensoriamento remoto usados (imagens de satélite, dados de scanner e fotografias aéreas) e na capacidade de reconhecimento dos objetos nas imagens.

#### 22.3.1 Dados de imagem

Os resultados desta pesquisa baseiam-se num conjunto de dados Ikonos de 24.04.2001, com uma resolução no solo de 1 m do canal pancromático e de 4 m nos canais multiespectrais. Os dados multiespectrais foram ajustados com auxílio de um *resolution merge* (método dos principais componentes) em sua resolução espacial à imagem pancromática (Erdas Imagine Field Guide, 1997).

No momento do imageamento, correspondente ao início do período de crescimento da vegetação, os estandes de junco não estavam ainda desenvolvidos plenamente, e eram dominados em sua reflexão espectral pelos talos dos juncos do ano anterior. Por este motivo, as classes desse estudo foram limitadas a Junco, Campos (incluindo superfícies pantanosas), Vimeiros, Água e Floresta.

#### 22.3.2 Monitoramento convencional

##### Verdade terrestre

Os métodos usuais para pesquisas temáticas em áreas aquáticas baseiam-se principalmente em mapeamentos ou na interpretação de fotografias aéreas. Mapeamentos de campo foram associados, com sucesso, a pesquisas da Estação Limnológica da Universidade Técnica de Munique referentes à degradação do junco nos lagos da Baviera, usando métodos de fotointerpretação (Grosser et al., 1997). Trabalhos de campo, mesmo com o apoio de fotografias aéreas, são muito dispendiosos em tempo e pessoal envolvido. Os custos resultantes são geralmente elevados e os intervalos temporais entre os mapeamentos são relativamente grandes.

##### Interpretação apoiada em fotografias aéreas

A interpretação de fotografias aéreas é uma tarefa padrão em mapeamentos de uso do solo, sendo efetuada principalmente por interpretação visual (Grosser et al., 1997). A análise visual também está associada a um considerável gasto de tempo, de acordo com a experiência do intérprete.

As fotografias aéreas, além das suas distorções geométricas, são problemáticas devido às diferenças de níveis de cinza, mesmo no contexto da imagem. Essas diferenças ocorrem em razão de diferentes ângulos ou tempos de tomadas.

Para um monitoramento contínuo, é necessária a obtenção de dados de alta resolução em espaços regulares, o que, pelos altos custos das fotografias aéreas, não é possível.

### 22.3.3 Dados de sensoriamento remoto de muito alta resolução

A resolução espacial dos dados de satélite disponíveis até o momento, como Landsat TM, Spot ou IRS não é suficiente para um monitoramento detalhado da vegetação marginal dos lagos. Em comparação com estes sistemas, os novos satélites da geração Ikonos dispõem de resoluções espaciais muito elevadas em combinação com informações multiespectrais e uma radiometria otimizada. Um monitoramento diferenciado das coberturas vegetais parece possível com ajuda desses dados. Na comparação com fotografias aéreas, além das características multiespectrais e da melhor radiometria, é importante especialmente a elevada taxa de repetitividade temporal dos sistemas sensores de muito alta resolução.

Resoluções espaciais de 1 m ou superiores são um pré-requisito para um monitoramento de estandes de junco aquático e permitem discriminar entre diferentes ecótipos de junco. A variância espectral muito maior dentre as classes de uso do solo terrestre, em paralelo com a alta resolução, resulta numa classificação muito mais difícil.

## 22.4 Estratégias de Classificação

Diferentes estudos demonstraram a limitação de procedimentos de classificação baseados em *pixel*, para a análise de dados de imagem de resolução muito alta (Blaschke, 2000a, b). Para compensar as desvantagens destes dados, foi usado para a interpretação, o sistema de análise de imagens eCognition orientado a objeto.

A análise de imagens nesse caso constitui-se de dois passos: uma segmentação inicial e a posterior classificação dos objetos de imagem, usando uma concepção de lógica *fuzzy*.

O algoritmo de segmentação no eCognition produz, com base em critérios de homogeneidade espectral, objetos de imagem em diferentes resoluções, ou seja, em diferentes níveis hierárquicos. Para cada segmento (objeto) são calculadas características de objeto e arquivadas num banco de dados. Em comparação com as concepções de classificação baseadas em *pixel*, que somente utilizam as características espectrais, os objetos de imagem conhecem, já no estado não classificado, os seus vizinhos e contêm diversas informações adicionais, tais como textura, forma, relações com, sobre, ou sub-objetos e diversas outras.

A classificação *fuzzy* no aplicativo eCognition baseia-se em diferentes características do objeto no banco de dados. Diferentemente dos algoritmos estatísticos de classificação, baseados em *pixels*, a classificação *fuzzy* substitui as rigorosas definições de classe "sim" e "não" por uma faixa de valores de 0 a 1, na qual pode ser alcançado um determinado grau de pertinência de classe (Bartz et al., 2000). São definidos um limite superior e inferior na faixa de valores bem como uma função de pertinência, a qual descreve a distribuição de valores dentro de uma característica.

Tendo como base as características do objeto, inicialmente é desenvolvido um regulamento básico em pequenas áreas-teste. As definições dentro do regulamento baseiam-se em características

espectrais, relações de vizinhança e na interpretação de dados derivados (p. ex.: índice de vegetação, índice de área foliar, razões de bandas). As classes que foram discriminadas com base em suas características de objeto, mas que são parte de uma unidade temática, são associadas a grupos.

### 22.4.1 Hierarquias de objetos

Um dos mais importantes pré-requisitos para a classificação de dados de sensoriamento remoto através de concepções orientadas a objeto, é a segmentação de objetos que tenham força descritiva, que contenham somente *píxéis* de uma classe semântica do mesmo grupo (Baatz e Schäpe, 2000). Como primeiro passo nessa direção, foi estabelecida uma hierarquia de seis planos num procedimento "de baixo para cima". Planos inferiores contêm pequenos objetos, tais como, árvores isoladas, arbustos ou campos de palha de vegetação. Estes objetos, por sua vez, estão contidos em segmentos dos planos superiores, que podem representar objetos semânticos como parques, campings etc.

Com base nesse trabalho preliminar, classificam-se determinadas classes de objeto (vide também Buck et al. neste volume) em diferentes planos. As classes que forem derivadas em apenas um plano, podem ser simplesmente assumidas em outros planos. Isso pode ocorrer, por exemplo, através da análise do percentual relativo de área de sub-objetos classificados.

Aquelas classes que são bem discriminadas em função dos seus valores espectrais médios, como gramados e água, ou "áreas úmidas" de modo geral, são classificadas no segmento de nível (plano) mais baixo. Em planos superiores, a classificação é efetuada com base nesta característica e das características espectrais de superfícies impermeabilizadas, como por exemplo, as estradas.

Estas classes somente são assumidas por um plano elevado para a classificação, quando por exemplo pelo menos 50% dos sub-objetos forem membros de uma classe correspondente. Neste plano são definidas outras funções de pertinência (p. ex.: relações de vizinhança, textura) e combinadas com as classes adotadas. Finalizando, este plano recebe todas as classes relevantes e representa a classificação definitiva.

### 22.4.2 Discriminação de objetos

A possibilidade de discriminar claramente as classes no espaço de atributos, é a base para o estabelecimento de um conjunto de regras para a classificação. Verificando-se a estratégia de classificação do eCognition, devem ser procuradas, na medida do possível, características de objetos, que distingam uma classe da outra (Baatz et al., 2000). No final, a definição de classe se constituirá de atributos que descrevem o objeto logicamente e com bom senso, observando que estes atributos servem exclusivamente para discriminá-lo dos outros objetos. No caso de estandes de junco, uma definição de classe será constituída inicialmente dos valores espectrais médios no infravermelho próximo e da distância espacial dos objetos à Água, que já foi classificada. Para diminuir a sobreposição com outras classes, como p. ex. os campos de palha ou superfícies impermeabilizadas próximas à margem, é usado o NDVI para a sua delimitação.

A definição de classes semânticas é freqüentemente muito complexa, pela característica de dados de sensoriamento remoto com alta resolução (Lillesand e Kiefer, 2000). Portanto, mesmo classes relativamente simples como água contêm seis sub-classes, correspondentes ao setor de águas profundas até águas rasas com estandes avulsos de junco. Posteriormente deve-se decidir quais

classes de águas rasas ainda pertencem ao grupo Água e quais classes já descrevem conjuntos de juncos aquáticos e conseqüentemente precisam ser agrupadas de modo diferente.

### 22.4.3 Resultados da classificação

Na área-teste principal, no setor próximo a Sankt Heinrich, parte terminal sul do lago Starnberg (Figs. 22.4 e 22.5) foram definidas, inicialmente, com base na época do imageamento (abril), somente algumas poucas classes: Estandes de junco, Campos de palha (incluindo áreas pantanosas), Água e Floresta (incluindo árvores individuais). Todas as outras classes, até mesmo superfícies impermeabilizadas, inicialmente permanecem não classificadas, ou não foram consideradas na interpretação.

A classificação orientada a objeto foi utilizada para segmentar objetos homogêneos e para usar relações de objetos com os seus vizinhos, como por exemplo, a distância ou limites relativos. Até o momento, isso foi aplicado especialmente para a delimitação dos estandes de junco.

Os resultados da classificação foram comparados com o Mapeamento das margens do lago Starnberg (MMLS) do ano 2000. O MMLS baseia-se numa interpretação visual de fotografias aéreas com uma resolução de 20-40 cm/pixel e intensivo trabalho de campo.

A camada temática da classificação com eCognition foi cruzada em ArcView 3.2 com o MMLS e, em seqüência, analisada em Excel numa tabela cruzada. A Tab. 22.1 mostra o resultado da comparação entre o plano 5 (dentro 6) com um tamanho de objeto médio inferior a 0,2 ha e o MMLS. Para esta comparação as superfícies do MMLS foram assumidas como corretas.

## 22.5 Discussão

Os resultados da classificação demonstram a capacidade dos conjuntos de regras, desenvolvidos até o momento, para discriminar objetos e formar classes semânticas. Há diversos

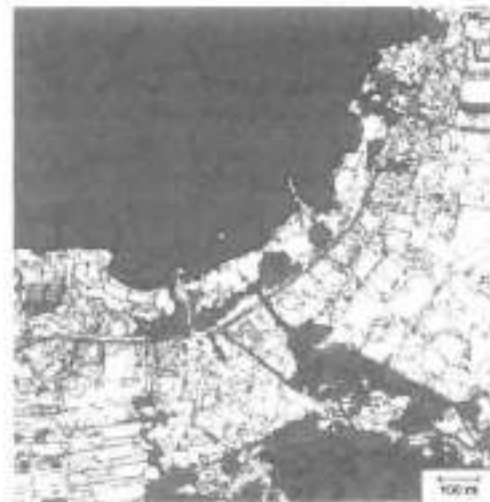


Fig. 22.4 Área-teste principal e classificação



Fig. 22.5 Mapeamento das margens do lago Starnberg (MMLS)



**Tab. 22.1** Precisão de classificação no nível de objeto 5. Os objetos foram transferidos de planos inferiores e testados

Mapeamento das margens do Lago Starnberg					
	Água	Junco	Campos c/ palha	Floresta	Outros
Água	96,3%	13,3%	0,0%	0,4%	1,7%
Junco	0,3%	63,8%	4,4%	10,9%	2,9%
Campos c/ palha	0,0%	0,8	74,2%	2,6%	12,1%
Floresta	0,2%	6,3%	4,2%	56,0%	10,5%
Não classificado	3,2%	16,6%	17,2%	30,2%	72,7%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

motivos para justificar os erros de classificação. Primeiramente precisam ser consideradas as diferentes datas de tomada de dados dos conjuntos de dados comparados (Ikonos de abril 2001 e MMLS de setembro 2000, em parte baseado em fotografias aéreas de setembro 2000). O junco nesta época está no início do seu período vegetativo e por isso mostra sobreposições com campos de palha e algumas superfícies impermeabilizadas.

Classes bem separáveis espectralmente como *água* mostram um resultado muito bom de 96,3% e somente poucas sobreposições. A superfície d'água do setor observado corresponde a aproximadamente 1/3 da área total. Ela inclui a superfície do lago e alguns canais estreitos. Os últimos estão contidos parcialmente no MMLS, porém não puderam ser extraídos dos dados de satélite tão precisamente, tendo levado a erros.

O *junco* foi reconhecido somente em 63% e apresenta fortes sobreposições com água, floresta e setores não classificados. Uma comparação dos dados leva à suposição de regressão da margem externa do junco, que é atribuída exclusivamente à data de tomada ser um pouco antes no início do período de crescimento. Por isso há classificações errôneas da água de 13,3%. Sobreposições com floresta são devidas à classificação de árvores isoladas dentro dos estandes de junco, que não estão contidos no MMLS tão detalhadamente.

Os *campos de palha* mostram um bom resultado, de 74,2%. Os erros se originam de confusões com junco e algumas superfícies impermeabilizadas (aquí não classificadas).

*Áreas de florestas* praticamente não existem neste setor e classificações errôneas são devidas à identificação de árvores isoladas. Outros erros resultam do fato de árvores caducifólias terem sido registradas no MMLS, porém a imagem Ikonos de abril dificilmente permitiria identificá-las.

As classes semânticas do MMLS muitas vezes são muito amplas e incluem tipos de classes diferentes. Algumas classes são representadas diferentemente no MMLS em comparação com a interpretação da imagem Ikonos. Classes semânticas que se originam de imagens de satélite de alta resolução, em consequência, não podem ser ajustadas exatamente nas classes de um mapeamento.

## 22.6 Resumo e Perspectivas

Um monitoramento da regressão do junco nos lagos da Baviera Superior é um passo no desenvolvimento de um sistema de detecção automática com base nas Diretrizes de Água da

União Européia. Sistemas de satélite modernos, de alta resolução, permitem registrar parâmetros aquáticos e terrestres. Com ajuda da análise de imagens orientada a objeto, os parâmetros correspondentes podem ser extraídos, observados e analisados, por exemplo, o desenvolvimento de estandes de junco. Os problemas deste estudo resultaram da data inadequada da tomada de dados. No entanto, com ajuda de procedimentos orientados a objeto, puderam ser obtidos resultados relativamente bons. Acreditamos que futuramente – com material de imagens adequado – um reconhecimento bem melhorado dos estandes de junco e da vegetação próxima à margem possa ser efetuado.

Dados de imagem de muito alta resolução contêm significativamente mais informações do que os dados de sistemas de satélite anteriores. Há problemas devidos à elevada variância espectral dos níveis de cinza dentro dos objetos. Em adição às distorções geométricas, as diferenças espectrais de imagens Ikonos de diferentes estações durante o ano, devidas ao ângulo de visada do sensor, constituirão provavelmente um problema na interpretação. Essas diferenças espectrais precisam ser analisadas e eventualmente corrigidas antecipadamente.

A classificação orientada a objeto permite extrair informações de dados de sensoriamento remoto com resolução extremamente elevada e contornar alguns dos problemas mencionados. Com base numa segmentação prévia, os objetos são classificados por um procedimento de lógica *fuzzy* por meio de características descritoras. Esses objetos são descritos não somente através de suas características espectrais, como p. ex., o valor médio dos níveis de cinza de todos os *pixels* dentro de um objeto, mas também por meio de parâmetros como vizinhança, textura e relações hierárquicas.

A tarefa principal é o desenvolvimento de sistemas de regras para a classificação automática, na base das diretrizes existentes na União Européia, que considerem as características de diferentes sistemas de sensoriamento remoto e que possam ser transferidas a diferentes regiões.

Uma outra concepção é a utilização de conhecimento adicional na forma de planos temáticos. Assim é possível dar enfoque para classes-núcleo "importantes". Objetos insignificantes para determinados questionamentos, podem ser derivados diretamente a partir desses planos temáticos e melhorados por meio de associações lógicas com informações dos dados de sensoriamento remoto.

Estas informações adicionais não entraram ainda nos nossos estudos, elas serão, no entanto, integradas futuramente.

## 22.7 Referências Bibliográficas

- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J. et al. (Ed.) *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, pp. 12-23, 2000.
- BAATZ, M.; HEYNEN, M.; HOFMANN, P.; LINGENFELDER, I.; MIMLER, M.; SCHÄPE, A.; WEBER, M.; WILLHAUCK, G. *eCognition User Guide*, DeGruyter, München, 2000.
- BLASCHKE, T. Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. In: *5. Symposium "Computergestützte Raumplanung" – CORP2000*, pp. 153-162, 2000a.

- BLASCHKE, T. Ohne Salz und Pfeffer. Objektorientierte Bildanalyse – eine Revolution in der Fernerkundung. In: *GeoBIT 2/2000*, pp. 30-32, 2000b.
- BUCK, A.; de KOK, R.; SCHNEIDER, T.; AMMER, U. Modular project design for simulating topological rules in object oriented analysis. In: BLASCHKE, T. (Hrsg.) *Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren – innovative Methoden*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 33-41, 2002.
- ERDAS Inc. *ERDAS Imagine Field Guide*. 4. ed. Atlanta: Erdas Inc, 1997.
- GOSLICH, C. *Freiflächenplanung für Feldafing und Nutzung am Starnberger See*. Diplomarbeit, TU Weihenstephan, 1975.
- GROSSER, S.; VEIT, E.; POHL, W.; MELZER, A. *Investigations into reed decline at Bavarian Lakes – The decline of reed stands and its triggering causes*. Limnological Research Station of the TU Munich, 1993.
- GROSSER, S.; POHL, W.; MELZER, A. *Untersuchung des Schilfrückgangs an bayerischen Seen*. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 141, 1997.
- ISELI, C., IMHOFF, T. 1989. Bielersee. 1987. Schilfschutz, Erhaltung und Förderung der Naturufer. Verein Bielerseeschutz, Nidau.
- KÖLBING, A. *Der Starnberger See und die seinem Trophiezustand angemessene Bewirtschaftungsweise des Coregonenbestandes*. Veröff. Zool. Staatssaml. München, 71, pp. 1-108, 1974.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and Image interpretation*, 4. ed. New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto: John Wiley & Sons, 2000.
- MELZER, A.; HERMANN, M. *Die quantitative Verbreitung der Makrophytenvegetation des Starnberger Sees*. *Ber. Bayr. Bot. Ges.* 51, pp. 31-56; 1980.
- OSTENDORP, W. *Röhrichtrückgang in Mitteleuropa*. DGL Tagungsband. Tagung in Essen, pp. 281-286, 1990.
- OSTENDORP, W. *Damage by episodic flooding to Phragmites-reeds in a prealpine lake: proposal for a model*. *Oecologia*, 86, pp. 119-124, 1991.
- OSTENDORP, W. *Schilf als Lebensraum*. In: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) *Beih. Veröff. Naturschutz Landschaftspflege Bad. Württ.* 68, pp. 173-280, 1993.
- ROTHPLETZ, A. *Die Osterseen und der Isarvorlandgletscher*. *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft München* 12, pp. 99-314, 1917.
- van der PUTTEN, W. H. *Die-back Phragmites Australis in European wetlands: an overview of the European Research Programme on Reed Die-back and Progression (1993-1994)*. In: *Aquatic Botany* 59, pp. 263-275, 1997.

## Classificação Automática de Biótopos Baseada em Dados de Scanner Aerotransportado de Altíssima Resolução

Monika Gähler, Ronald Janowsky e Uwe Schröder

### 23.1 Introdução

A motivação para o projeto piloto que apresentamos a seguir é o ajuste do canal fluvial do rio Elbe inferior e exterior para a navegação de navios com container (BfG, 2000). No âmbito de controle ambiental desta obra, foi exigido um monitoramento dos biótopos próximos às margens que estarão submetidos às mudanças de nível das águas, para detectar o impacto nas comunidades de vida terrestre devido à influência das marés neste setor do rio Elbe, bem como verificar as mudanças previstas num estudo de impacto ambiental realizado nessa área. Para poder demonstrar eventuais tendências de uma mudança, deve-se garantir a possibilidade de comparação de mapeamentos de diferentes épocas, havendo ainda rigorosas exigências de precisão geométrica dos dados de sensoriamento remoto usados.

Os métodos convencionais para a detecção de biótopos, tais como o mapeamento terrestre e a interpretação visual de fotografias aéreas em infravermelho coloridas (CIR) analógicas para atualizações constantes, não são satisfatórios. O elevado gasto em tempo e custos é um problema quando há necessidade de dados num curto espaço de tempo (Janowsky et al., 2001). Por outro lado, com os métodos de registro e processamento de dados até agora usados, a necessária comparação exata dos conjuntos de dados, não está garantida. A subjetividade na interpretação, as generalizações bem como uma elevada tolerância de erros em relação à delimitação espacial dos biótopos resulta em que alterações de características da paisagem são identificadas tão-somente com limitações.

Assim sendo, para o monitoramento exigido precisava ser encontrado um procedimento que diminuísse tanto o trabalho efetivo, por meio de um alto grau de automação e padronização em relação aos procedimentos convencionais de registro de tipos de biótipos e que satisfizesse às elevadas exigências de precisão.

A utilização de dados digitais de sensoriamento remoto de alta resolução, em combinação com procedimentos de interpretação adequados, representa uma possível concepção para ultrapassar os problemas mencionados na detecção e atualização regular da condição da paisagem.

O Instituto de Estudos Ambientais (IUW) da Escola Superior de Vechta (Alemanha) foi incumbido pela Agência Federal de Águas (BfG) de desenvolver e testar um método padronizado de análise de imagens para monitorar os biótipos no setor do rio Elbe inferior e exterior, a partir de dados de scanner com máxima resolução HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera-Airborne*).

### 23.2 A Área de Estudo

A área de estudo localiza-se ao longo do setor inferior do rio Elbe influenciado pelas marés, entre as cidades de Glückstadt e Geesthacht na fronteira dos Estados da federação Niedersachsen, Schleswig-Holstein e Hamburgo. Três seções representativas foram escolhidas como áreas-testes:

- A ilha Pagensand no rio Elbe, aproximadamente a 20 km a jusante de Hamburgo, apresenta uma grande variedade de tipos de biótopos e de uso da terra – incluindo desde setores fortemente modificados pelo homem como obras de proteção litorânea e campos de irrigação, até estruturas naturais como juncos, florestas de várzea e de maré, e campos alagáveis.

- A área de proteção ambiental Heuckenlock na borda sudeste da região metropolitana de Hamburgo inclui grandes áreas com junco, meandros abandonados do rio, estandes de campos alagáveis e florestas de várzea.

- O setor próximo à embocadura do afluente Ilmenau do lado esquerdo do rio Elbe é dominado em sua maior parte por diferentes tipos de áreas verdes, porém há também extensos setores com juncos e áreas úmidas sem uso.

A parte principal do estudo foi realizada com os dados da ilha Pagensand, visto que nesta ilha a maior parte dos biótopos que ocorrem em toda a área está representada. A região Heuckenlock serviu como referência para a validação da metodologia desenvolvida.

### 23.3 Base de Dados

A base digital de dados foi constituída de imagens do HRSC-A da DLR – *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, a Agência Espacial da Alemanha. O HRSC-A é um scanner estereoscópico multiespectral digital para aplicações fotogramétricas e de sensoriamento remoto em geral. Com relação aos dados técnicos desse scanner multilinhas, vide artigo de Ehlers et al. neste volume. Informações mais detalhadas, especialmente sobre o processamento de imagem e outras possibilidades de aplicação, encontram-se, dentre outros, em Möller (2000), Hoffmann e Lehmann (2000), Wewel et al. (1998).

Em setembro de 1999 foi efetuado o imageamento das três áreas-teste. Numa altitude de voo de 3.000 m obteve-se uma resolução de *pixel* de 0,15 m. Como exatidões absolutas, foram indicadas  $\pm 20$  cm na horizontal e  $\pm 30$  cm na vertical.

Em paralelo com o imageamento, foram realizados controles muito detalhados no solo, e especialmente a ilha Pagensand foi mapeada muito precisamente usando-se um GPS. Os biótipos identificados em campo puderam ser plotados nas imagens do HRSC-A por meio da chamada “digitalização na tela” (*On-Screen-Digitizing*) com grande precisão da posição e integrados diretamente na base digital de dados.

### 23.4 Análise de Imagens

Para a derivação automática de biótipos, com base nos dados do HRSC-A, foi desenvolvida pelo IUW uma seqüência de classificação hierárquica (Ehlers et al., 2000), caracterizada pelos seguintes passos de processamento principais (vide Fig. 23.3):

- Separação de informações em diversas camadas de informação semântica (1. não vegetação, 2. sombra, 3. vegetação baixa de gramas, 4. vegetação de grande porte);
- Classificação ajustada individualmente às informações semânticas (classificação não supervisionada e supervisionada);
- Pós-processamento:

Justaposição dos resultados de classificação, definição do tamanho de áreas mínimas dos biótipos, preenchimento dos setores com sombras.

#### 23.4.1 Derivação de outras informações a partir de dados de imagem

As larguras de banda dos canais multiespectrais do sistema de imageamento HRSC-A estão apresentadas no artigo de Ehlers et al., neste volume. A faixa de comprimento de onda "vermelho visível" (-0,6-0,7 nm), que contém informações muito importantes para a interpretação de vegetação, não é registrada num canal espectral separado. Em função disso, foi produzido um canal vermelho sintético, com a ajuda de operações aritméticas e utilizando os canais do infravermelho próximo e do pancromático. Este canal vermelho artificial pôde ser utilizado para uma representação em cores reais, bem como no passo seguinte, para o cálculo de índices de vegetação. Não obstante os índices de vegetação usuais, e mesmo usando o canal sintético vermelho calculado, eles não levaram a resultados aceitáveis (Gähler, 2000). Em razão disso, no IUW tentou-se definir índices de vegetação baseados em canais espectrais do HRSC-A. Os melhores resultados obtidos foram por meio da subtração do "canal vermelho sintético" menos Canal 1. A imagem resultante do primeiro cálculo "canal vermelho sintético" menos canal 1 separa a Não vegetação sem sombra da Vegetação de gramas com sombra. No segundo cálculo (canal 4 menos canal 1) ocorre uma separação em Vegetação com grama sem sombra e Não vegetação com sombra.

Aos dados multiespectrais foi aplicada, adicionalmente, uma medida de textura para a interpretação. O uso de uma imagem com variância filtrada (matriz de 7x7 na base do canal pancromático com bordas realçadas) demonstrou ser especialmente útil para diferenciar tipos de biótopos e de uso do solo com superfície muito lisa, como água ou superfícies ceifadas (agricultura) daquelas com estrutura muito rugosa como junco ou arbustos. Para efetuar a classificação e a visualização, foram agregadas aos canais multiespectrais: a camada de textura calculada, a banda sintética vermelha e o MDS (modelo digital de superfície) levemente modificado.

#### 23.4.2 Separação de informações

Os índices de vegetação desenvolvidos permitem a separação exata de Vegetação e Não vegetação, bem como a eliminação das áreas sombreadas. Com os índices de vegetação calculados como máscaras, as imagens multibandas foram divididas em camadas de informação semanticamente declaradoras (Vegetação e Não vegetação sem influência de sombras). Na etapa de trabalho seguinte foi possível diferenciar entre vegetação baixa e alta através de um limiar de altitude, utilizando um MDS. As imagens de várias bandas resultantes (vide Fig. 23.1) foram posteriormente trabalhadas com algoritmos de classificação (vide Fig. 23.2 com fluxograma de trabalho da segmentação).



Fig. 23.1 Discriminação das informações com a ajuda de índices em máscaras e de um limiar alométrico; exemplo de uma seção da ilha Pagensand (rio Elbe). [Esquerda: não-vegetação; centro: vegetação baixa (<12 m); direita: vegetação alta]

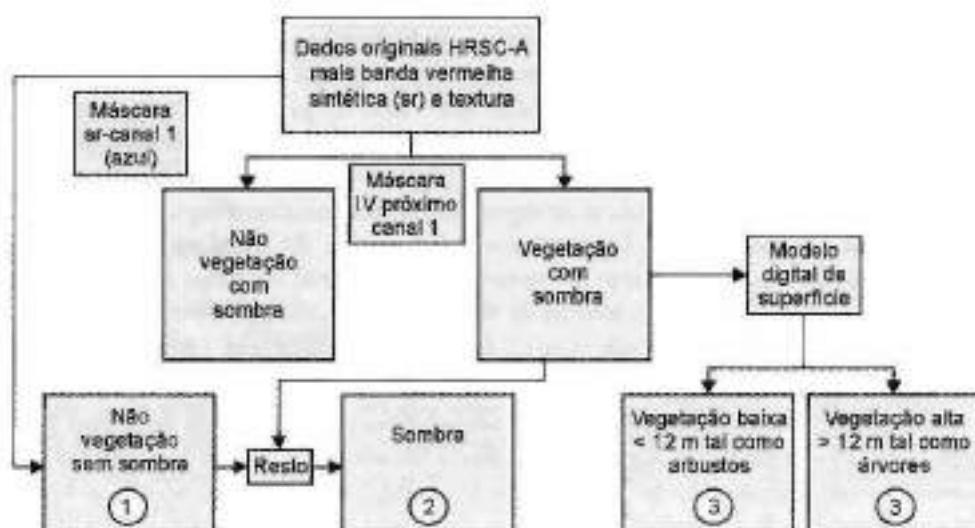


Fig. 23.2 Fluxograma esquemático de separação das camadas de informação Não-vegetação / Sombras / Vegetação alta e baixa com ajuda de máscaras apoiadas em índices

### 23.5 Classificação dos Diferentes Conjuntos de Informação

A classificação posterior do conjunto de informação da não vegetação pôde ser executada com uma classificação não supervisionada (*Unsupervised Clustering*). Para discriminar a vegetação (tanto a vegetação baixa como a alta) foi necessário fazer uma classificação supervisionada (máxima verossimilhança).

O procedimento baseia-se em amplos experimentos de classificação, ou seja, no teste de um número de alternativas do processamento. Foram aplicadas análises de erro para desenvolver o procedimento que obteve os melhores resultados (Ehlers et al., 2000; Gähler, 2000). Se bem que o HRSC-A, devido à falta de um "legítimo canal vermelho", forneça apenas limitadamente

informações multiespectrais, por meio deste método, na ilha Pagensand foram diferenciados cinco tipos de biótipos de não vegetação, doze tipos de vegetação de porte baixo e quatro tipos de vegetação alta.

### 23.6 Pós-processamento dos Resultados de Classificação

Devido à elevada resolução espacial dos dados do HRSC-A, na classificação executada puderam ser identificadas mesmo as menores áreas. No decorrer do projeto, verificou-se que valores de áreas mínimas associados a cada biótipo, faz sentido. Por isso, ao se fazer a junção dos resultados individuais de classificação, que estavam submetidos a uma lista de prioridades definida, foram estabelecidas áreas mínimas de superfície para cada tipo de biótipo (p. ex., área mínima de estandes fechados de árvores: 200 m<sup>2</sup>).

Após a junção das imagens individuais e da definição dos tamanhos mínimos das áreas, o resultado da classificação ainda não inclui os setores sombreados. Utilizando uma matriz de filtragem é possível preencher estes setores. Por outro lado, devido à suavização dos limites entre os diferentes tipos de biótipos, ocorre uma falsificação desses limites. Para minimizar as distorções dos limites, e utilizando o MDS, as sombras foram divididas em duas classes: acima e abaixo de 12 m. A seguir, somente as sombras acima de 12 m de altitude foram preenchidas. Na filtragem aplicada, a condição estabelecida para o cálculo de um *pixel* de sombra (acima de 12 m) foi considerar apenas as possíveis classes de tipos de biótipos da "vegetação alta". Os setores de sombra, que estão abaixo de 12 m foram considerados, em razão disso, "vegetação não alta". Na Fig. 23.3, apresenta-se o procedimento desenvolvido para a classificação de tipos de biótipos, esquematicamente. Para padronizar e automatizar esta seqüência de classificação hierárquica, trabalhou-se com o módulo "Spatial Modeler" da Erdas Imagine. Aqui, dispõe-se

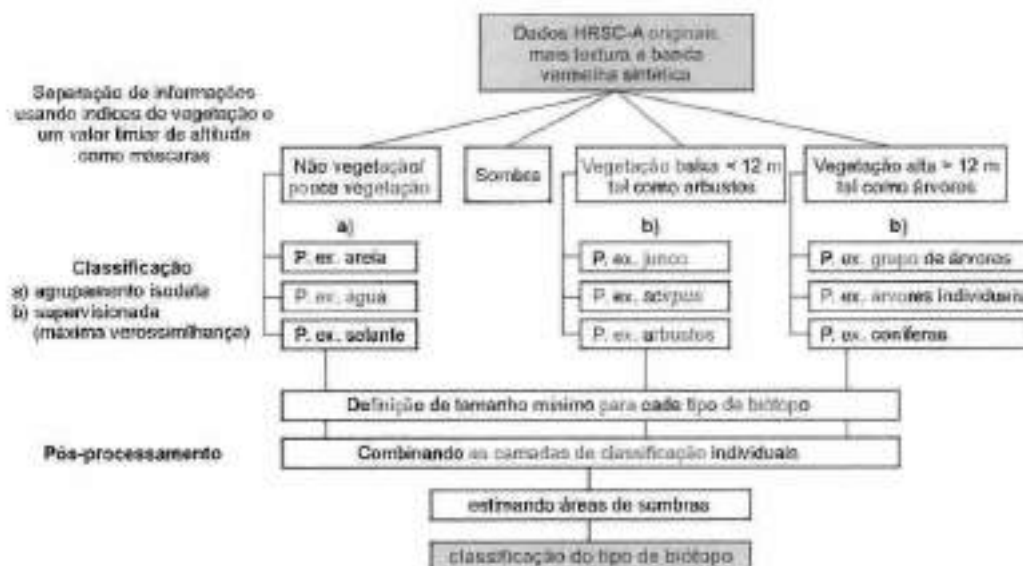


Fig. 23.3 Fluxograma da seqüência de classificação



de um instrumento, com ajuda do qual num "modelo", pode ser definida uma determinada seqüência de diferentes funções Erdas Imagine<sup>®</sup>.

### 23.7 Validação e Avaliação dos Resultados

Numa comparação de resultados da classificação automática de tipos de biótopos com os resultados do mapeamento terrestre e posterior digitalização na tela, foram verificadas diferenças. No exemplo do recorte da área-teste ilha Pagensand, os desvios entre os resultados do mapeamento no terreno e classificação no computador são explicados (vide Fig. 23.4). Esta figura mostra nitidamente que a delimitação dos estandes, auxiliada pelo método de classificação por computador, permitiu uma precisão de posição muito elevada. Mesmo pequenos estandes ou árvores isoladas podem ser reproduzidos em sua posição exata. No âmbito de um mapeamento de grandes áreas, isso geralmente não é possível, devido ao grande volume de trabalho representado pelo redesenho de cada árvore individual. A generalização aqui fica bastante nítida, ao se observar a posição e delimitação dos juncos de praia bem como os estandes de matas.

Com ajuda do procedimento desenvolvido, podem ser localizadas zonas de perturbação na área do junco. Neste caso há setores que correspondem a áreas de cobertura vegetal arbustiva mista úmida. Uma discriminação de conteúdo entre junco com talo terrestre e junco com talo influenciado pela maré não é possível pela classificação de imagem. Essa diferenciação, em caso de necessidade, poderia ser efetuada manualmente. De modo geral, a classificação de tipos de biótopos, nesse setor, mostra uma maior precisão de conteúdo e geometria do que o mapeamento terrestre de biótopos.

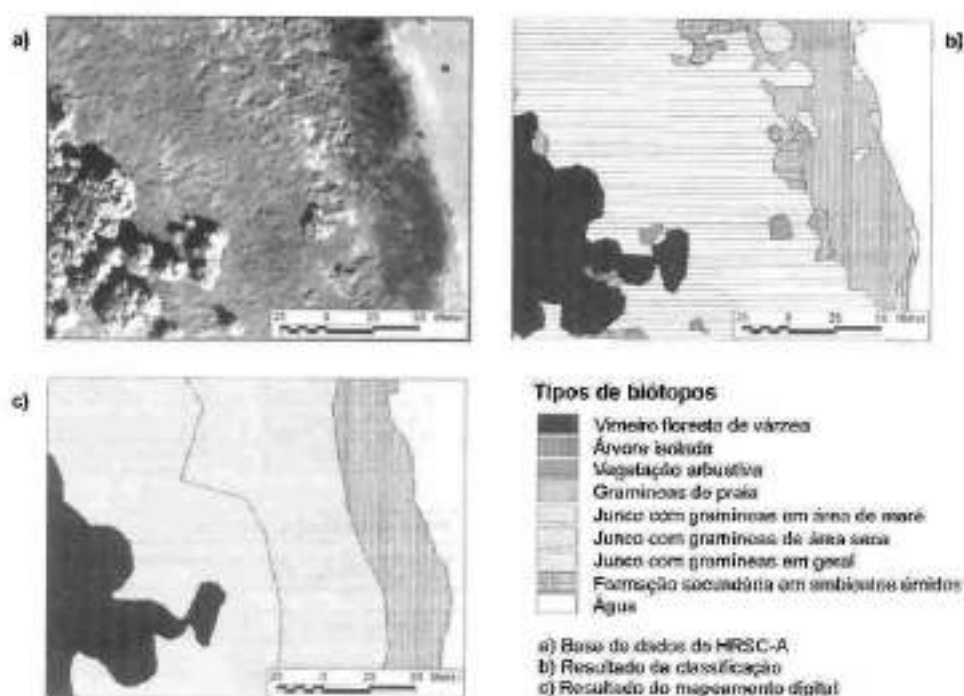


Fig. 23.4 Comparação do resultado de classificação com base num setor da ilha Pagensand

Conseqüentemente, em virtude da generalização da delimitação convencional de tipos de biótopos, a base de referência existente serve só condicionalmente para a validação dos resultados da classificação de imagem. Em função desse problema, os dados convencionais de precisão da classificação possuem tão-somente uma limitada capacidade de definição.

Uma alternativa é o teste dos resultados de classificação dos tipos de biótopos, por meio do controle de campo. A BfG (Agência Federal de Águas), utilizando um sistema DGPS testou 200 pontos bem como as delimitações das áreas dos biótopos. Os dados foram transferidos para um SIG e comparados com o resultado da classificação. Verificou-se então uma grande concordância dos resultados da classificação de imagem por computador, com a realidade de campo. Os limites da classificação foram avaliados como altamente satisfatórios, sendo que somente num caso isolado ocorreram limites inexatos e classificações errôneas.

A condição de aplicação deste procedimento a uma outra área-teste (Heuckenlock) foi demonstrada com sucesso no IUW. As áreas de treinamento necessárias para uma classificação supervisionada foram definidas visualmente e executada uma associação com tipos de biótopos, através da comparação das características de classes de objetos com os resultados da ilha Pagensand, sem a utilização dos mapeamentos previamente existentes.

### 23.8 Conclusões

No projeto apresentado, foi analisado o potencial dos dados de scanner digital aerotransportado de altíssima resolução, para o monitoramento preciso de tipos de biótopos. A base digital de dados permitiu o desenvolvimento de um procedimento seqüencial padronizado e automatizado de classificação. A utilização desse procedimento em outras áreas-teste foi completada com sucesso.

A objetividade e a rapidez na interpretação e a possibilidade de reprodução dos resultados através da interpretação semi-automática, por computador, podem ser garantidos pelos dados digitais disponíveis e pelos procedimentos desenvolvidos. Conseqüentemente, a classificação de dados digitais do scanner HRSC-A pode servir como uma base de dados confiáveis e exatos, para um monitoramento duradouro. Os dados originais podem ser utilizados a qualquer momento e uma observação ou posterior análise em diferentes escalas é possível continuamente. Além disso, os resultados de classificação digital podem ser integrados diretamente num ambiente SIG e sobrepostos e combinados com outros planos de dados (*layers*) disponíveis.

O método desenvolvido neste projeto piloto será aplicado num projeto posterior em toda a área do rio Elbe sob influência das marés, entre Glückstadt e Geesthacht.

### 23.9 Referências Bibliográficas

- BfG – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE. *Computergestützte Klassifizierung von Biotoptypen auf der Grundlage digitaler hochauflösender multispektraler Scannerdaten. (HRSC-A). Projektabschlussbericht, 2000.*
- EHLERS, M.; MÖLLER, M.; JANOWSKY, R.; GÄHLER, M. *Entwicklung einer Methode zur automatisierten Biotoptypenerfassung auf der Grundlage von HRSC-A Scannerdaten. Projektabschlussbericht, 2000.*

- GÄHLER, M. *GIS-basierte Biotoptypenklassifikation auf Grundlage von multispektralen HRSC-A-Scannerdaten. - Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Elbinsel Pagensand.* Diplomarbeit, Universität Osnabrück, 2000.
- HOFFMANN, A.; LEHMANN, F. Vom Mars zur Erde – die erste digitale Orthobildkarte Berlin mit Daten der Kamera HRSC-A. *Kartographische Nachrichten* 50, Heft 2, pp. 61-71, 2000.
- JANOWSKY, R.; SKUBSKI, T.; BÖGELSACK, E.; KASTLER, T.; LUDOWICY, C.; WEIDEMANN, D. *GIS-gestütztes Biotoptypenmonitoring – dargestellt am Beispiel der Insel Nordney.* In: Vechtaer Studien zur angewandten Geographie und Regionalwissenschaft (VSAG), Vechta, Band 22, pp. 101-107, 2001.
- MÖLLER, M. New Applications of Very High Resolution Digital Airborne Scanner Data. *IAPRS*, Amsterdam, v. 33, B4/2, Comm. 4, pp. 663-669, 2000.
- WEWEL, F.; SCHOLTEN, F.; NEUKUM, G.; ALBERTZ, J. *Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie.* In: PFG, Heft 6, pp. 337-348, 1998.

## **Automação de SR com Base num Exemplo de Monitoramento Operacional de Clorofila no Mar Báltico**

Bernd Fichtelmann, Erik Borg, Adolf Günther, Heiko Damerow, Hans-Georg Gu-  
der, Carsten Brockmann, Edwina Wolff, Roland Reimer e Bettina Baruth

### **Resumo**

Para derivar informações do comportamento espacial e temporal de um ecossistema a partir de dados de sensoriamento remoto, são necessários não apenas indicadores adequados que reajam às mudanças de parâmetros críticos do sistema. Essas mudanças precisam ser reconhecidas, na medida do possível, o mais próximo da época em que ocorreram, além de estarem a salvo de intervenções interativas e, com isso, a fatores subjetivos. Somente assim os dados de sensoriamento remoto estão em condições de satisfazer à demanda de parâmetros de entrada com base física em modelos de processo e de meio ambiente, e serem usados em tarefas de monitoramento.

O monitoramento regional da clorofila no mar Báltico é um exemplo de um produto com valor agregado, que é produzido desde março de 1998 no Centro de Dados de Sensoriamento Remoto Alemão (DFD), na cidade de Neustrelitz, por meio de uma cadeia de processamento totalmente automática. Tal automação de processos é uma contribuição essencial para minimizar o uso de mão-de-obra no monitoramento. Além disso, esta automação exige que se obtenha uma otimização quanto à precisão e à operacionalidade. Neste trabalho são apresentados alguns exemplos selecionados de monitoramento. Pela equipe do Projeto MAPP (MERIS Advanced Product Project) foram preparados outros produtos de valor agregado, tanto no que se refere ao monitoramento costeiro como também para pesquisas de uso/cobertura do solo e da atmosfera. A cadeia de processamento correspondente foi instalada no DFD, em Neustrelitz.

### **24.1 Automação em Sensoriamento Remoto**

#### **24.1.1 Exigências de um processamento automático de dados de sensoriamento remoto**

Uma das mais importantes tarefas para a utilização operacional de dados de sensoriamento remoto é a distribuição desses dados e sua derivação em produtos de maior valor, pouco tempo após sua recepção. Esta exigência é eventualmente passível de realização em conjuntos de dados individuais, por meio da utilização de um operador. O usuário "comum" não está em condições de processar uma grande quantidade de conjuntos de dados, passo a passo, e com qualidade sempre igual. Especialmente quando da utilização de um software complexo de processamento,

como por exemplo, a correção atmosférica, a repetição de um passo do processamento, mesmo por um usuário experiente, com certeza não levará ao mesmo resultado. Esses desvios devidos a influências subjetivas, se por um lado contradizem as exigências de um monitoramento, por outro permitem que o especialista no processamento de dados de sensoriamento remoto esteja em boas condições de reconhecer determinados fenômenos dentro de uma cena. Se numa cadeia de processamento não estiver implementado um algoritmo de detecção para a sua identificação, possivelmente esses fenômenos também não serão reconhecidos. Assim sendo, a automação de processos significa não somente a economia de mão-de-obra e a garantia de uma qualidade constante, mas inclui especialmente a procura pelo *ótimo* em termos de operacionalidade e precisão.

O sensoriamento remoto atualmente fornece, na maioria dos casos, informações mais ou menos qualitativas. Para, no entanto, encontrar a aceitação em programas ambientais estabelecidos, precisa ser executada a transição para o sensoriamento remoto quantitativo. Isto inclui que os procedimentos sejam colocados sobre uma base física confiável. Uma rigorosa exigência nesse contexto é a inclusão de uma análise de erros. Esta fornece ao usuário tanto a faixa de confiabilidade do seu produto como os limites de sua aplicabilidade. Somente por meio de um tal procedimento será possível, num certo momento, corresponder às expectativas de demandas judiciais de oferecer informações incriminadoras com base em dados de sensoriamento remoto (Borg, 1999). Argumentos para uma tal tendência são fornecidos por atividades internacionais de proteção à natureza, relacionados com acordos multilaterais (Blaschke, 2001). Exemplos são a diretiva flora, fauna e habitat ou a Diretriz Geral de Águas da União Européia.

Outro déficit na avaliação da natureza e do meio ambiente consiste no fato de que um grande número de indicadores empíricos complexos foi desenvolvido para a modelagem, que não podem ser fornecidos pelo sensoriamento remoto. Na medida do possível, tais índices devem ser complementados ou ainda substituídos completamente por valores mensuráveis. Eventualmente, indicadores empíricos complexos, que não são detectáveis por sensoriamento remoto, devem ser substituídos por indicadores novos a serem desenvolvidos. Tal passo é de grande importância, não somente para o avanço da automação do sensoriamento remoto.

Além disso, é sabido que a demanda por informação contínua, incluindo as questões ambientais, está crescendo constantemente. Somente o registro das condições do sistema, durante um espaço de tempo maior, permite calcular ou derivar tendências da sua variabilidade natural, em relação complexa com os diferentes fatores naturais ou humanos que influenciam estas tendências. Essas exigências estão associadas não somente a uma elevada repetição temporal e espacial, mas, em paralelo, à disponibilidade de satélites e sensores adequados.

Um grande número de processadores, os diferentes dados de saída e produtos de sensoriamento remoto, bem como um serviço aos usuários de alta qualidade, exigem um ambiente técnico adequado, que gerencie os dados e informações, bem como controle e comande os diferentes elementos de uma cadeia de processos, tal como num grande chão de fábrica. O monitoramento regional da clorofila no mar Báltico constitui um exemplo de um produto com valor agregado, o qual foi elaborado por meio de uma cadeia de processamento totalmente automática, a partir de março de 1998, no Centro de Dados de Sensoriamento Remoto Alemão (DFD), na cidade de Neustrelitz.

### 24.1.2 Cadeia de processos para a produção automática de um mapa de clorofila do mar Báltico

#### Disponibilidade de dados

O espectrômetro imageador *Multispectral Optoelectronic Scanner* (MOS) é um componente do pacote de sensores do satélite indiano IRS-P3. Este sensor experimental foi desenvolvido especialmente para o monitoramento da cor dos oceanos e de fenômenos marinhos, pelo Instituto de Metodologia do Sensoriamento Remoto (DLR MF). Além disso, ele permite a derivação da distribuição regional de aerossóis, parâmetros de nuvens e vapor d'água. O sensor MOS possui uma resolução geométrica de 500 m e uma largura de faixa imageada de 200 km. Através da órbita do IRS-P3 é obtida uma taxa de repetição de 24 dias. Em quatro dias subsequentes obtém-se respectivamente um conjunto de dados sobre o mar Báltico. No quinto dia não obtém-se dados desta região. Após 13 dias é obtida uma cobertura praticamente completa de todo o mar Báltico.

Nos últimos anos o satélite indiano, durante o período das monções, operava num modo de economia de energia, de forma que não havia disponibilidade de dados. No inverno, também não há disponibilidade de resultados, visto que as baixas temperaturas reprimem a bioprodutividade dos mares. Além disso, o percentual de cobertura de nuvens de 40-60% na área de estudo, dificultou as observações. A Tab. 24.1 fornece uma visão sinótica dos conjuntos de dados utilizáveis, a partir de março de 1998, para uma determinação do conteúdo de clorofila, sendo que a limitação devido ao grau de cobertura de nuvens da superfície líquida fica clara após uma avaliação inicial.

**Tab. 24.1** Visão estatística dos mapas disponíveis da concentração de clorofila por frequência mensal. As linhas identificadas com (\*) designam conjuntos de dados nos quais, conforme uma avaliação inicial, há mais de 50% da superfície líquida sem cobertura de nuvens

	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Mapas Total
1998	----	17	14	14	----	----	6	17	21	17	106
*	----	5	4	7	----	----	3	10	6	—	37
1999	----	12	16	24	3	10	----	----	—	—	65
*	----	5	6	16	2	5	----	----	—	—	30
2000	4	20	17	17	—	----	12	12	5	—	87
*	1	5	6	12	—	----	7	7	4	—	42
2001	2	13	9	19	16	17	15				41
*	—	3	2	12	10	14	6				16

## 24.2 Estruturação da Cadeia de Processos

A cadeia de processos que foi descrita detalhadamente por Wolff et al. (1998), resumida na Fig. 24.1, está estruturada sobre dados MOS-B, nível 1B. Os dados brutos são recebidos operacionalmente na estação terrestre Neustrelitz e posteriormente processados até este nível (Missling e Bettau, 1997). Uma primeira seleção de dados é efetuada após a numeração segura

das áreas imageadas pelos satélites, que permitem registrar toda a área do mar Báltico. A partir disso, é testada a adequação das cenas parciais através das suas coordenadas geográficas de cantos. Outro critério de seleção de dados é o ângulo de elevação solar, para poder excluir as condições de iluminação insatisfatórias. Somente quando houver disponibilidade de cenas adequadas, o processamento é continuado.



Fig. 24.1 Representação esquemática da cadeia de processamento

A cadeia de processamento garante no final o arquivo e o gerenciamento dos resultados num banco de dados, os *quicklooks* correspondentes com os resultados são oferecidos pelo sistema de banco de dados ISIS (abreviação em alemão de Sistema de Informação Inteligente de Dados de Satélite - *isis.dlr.de*) da DFD e o resultado mais atual está disponível nas páginas da *web* da DLR (*dfd.dlr.de*).

O passo de processamento seguinte consiste numa máscara Nuvens-Água-Terra, visto que tanto a correção atmosférica como o cálculo de concentração da clorofila, que vem a seguir, são possíveis apenas em setores de imagem com um mar Báltico sem nuvens. No teste a seguir é verificado se é possível identificar uma área suficientemente grande e contínua de água com os "pixels de água sem nuvens". Se não for o caso, a cadeia de processamento é interrompida neste momento.

A correção atmosférica, realizada em seguida, é aplicada exclusivamente aos pontos de imagem identificados como "mar Báltico sem nuvens", e baseia-se num modelo de Gordon e Sturm (Gordon, 1978; Krawczyk et al., 1995; Krawczyk et al., 1996; Krawczyk e Hetscher, 1997; Sturm, 1981; Sturm, 1997). A equipe MOS tornou esta parte da cadeia de processamento disponível ao público. Siegel (IOW) (Siegel et al., 1997) tornou disponível o algoritmo para a derivação da concentração de clorofila (clorofila e feo-pigmento). Uma discriminação entre águas litorâneas e mar aberto (Brockmann, 1993; Morel, 1980) ainda não foi executada nesse demonstrador.

Após esses passos de processamento, os resultados precisam ser elaborados num mapa para uma representação visual. Eles são estendidos logaritmicamente e transferidos a um mapa por meio de uma escala de cores adequada.

Na Fig. 24.2 há um exemplo de um dos mapas de concentração de clorofila. Conforme mencionado anteriormente, o algoritmo para a derivação da concentração de clorofila, é um algoritmo especial para o mar Báltico. Além disso, não foi efetuada uma discriminação entre águas litorâneas e mar aberto. Por meio da estruturação em módulos da cadeia de processamento, são possíveis melhorias e ampliações de forma muito simples. Assim, por exemplo, é necessário um módulo para a correção geográfica e para tarefas futuras. Apesar disso, os resultados desse demonstrador fornecem uma boa visão de conjunto sobre o que é possível com cadeias de processamento automático que estão disponíveis para cada usuário já poucas horas após a recepção de dados. Esse mapa pode ser interpretado por qualquer usuário inexperiente e no caso de desastres ambientais (p. ex., acidente com navio tanque), pouco tempo após a ocorrência, já se dispõe dos dados para mais pesquisas.

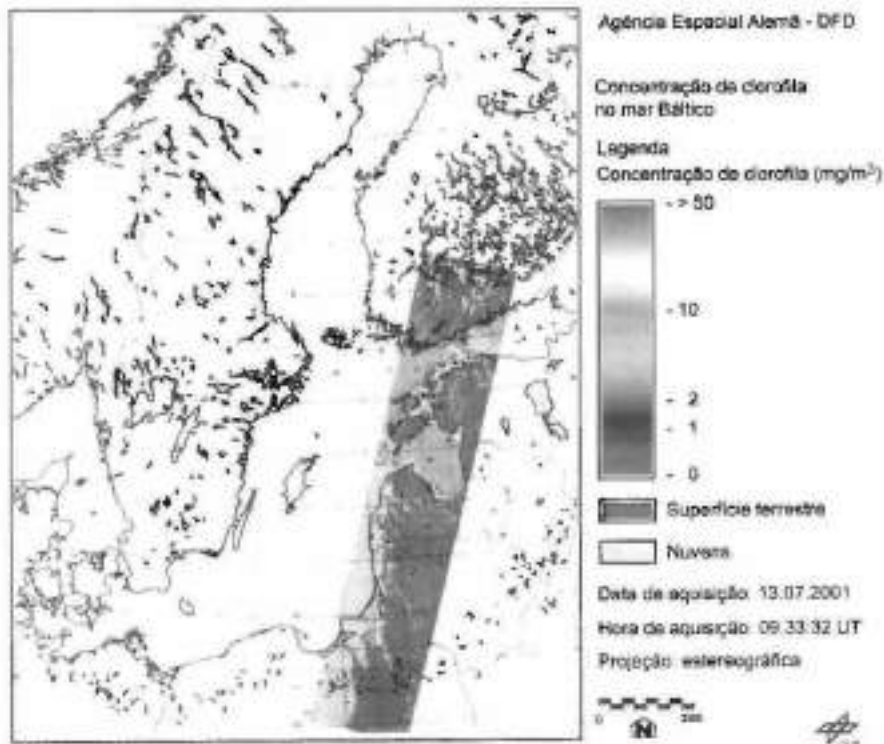


Fig. 24.2 Exemplo de um quicklook de 13.07.2001, como está disponível para um usuário não cadastrado, que esteja usando ISIS ou a WWW. Sobressaem as concentrações mais elevadas de clorofila na área da foz do rio Parna, na parte norte do Golfo de Riga

## 24.3 Resultados da Cadeia de Processamento Automática para um Produto Regional

### 24.3.1 Monitoramento de seções selecionadas do mar Báltico

Uma visão de conjunto dos mapas de concentrações de clorofila, desde o início do monitoramento em março de 1998 já foi apresentada na Tab. 24.1. Nesse período é bem



perceptível a variação especialmente elevada da concentração de clorofila na área da embocadura de rios. Um exemplo é apresentado na Fig. 24.3, mostrando um recorte da baía de Danzig, com resultados dos anos de 1996 a 2001. As cartas dos anos 1996 e 1997 também resultaram da cadeia de processamento. Para esta representação, os dados arquivados correspondentes ao nível 1B do MOS-B, foram colocados no início da cadeia e processados de acordo com o padrão,

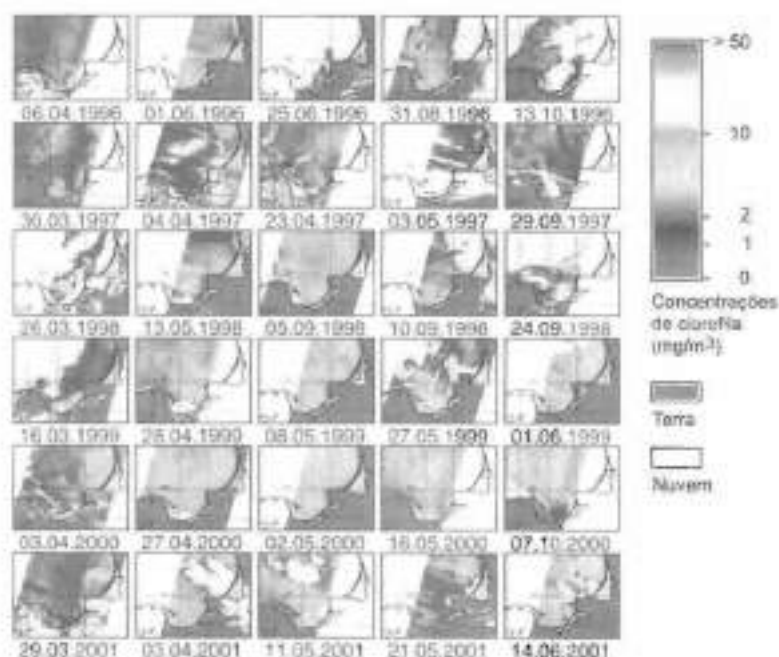


Fig. 24.3 Recortes dos quicklooks da concentração de clorofila, obtidos automaticamente para as regiões costeiras da baía de Danzig e Kurisches Haff

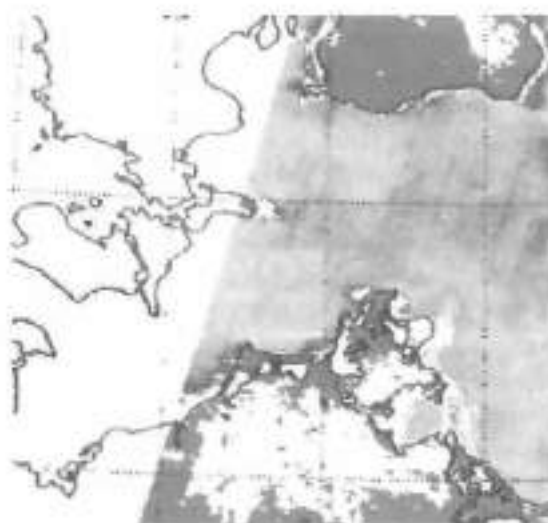
Como demonstrador, a cadeia de processamento fornece uma visão de conjunto sobre a variação de clorofila ao longo do ano na área de estudos. São muito bem perceptíveis, por exemplo, as concentrações extremamente elevadas nas datas 6.4.1996, 16.3.1999 ou 27.4.2000. Os dados de clorofila de 16.3.1999 refletem ainda as condições das correntezas na baía de Danzig. Mais exemplos de monitoramento de outras áreas do mar Báltico, como o setor litorâneo da região de Mecklenburg-Vorpommern, ou seja da baía de Riga, foram apresentados por Fichtelmann et al. (2001a) e Fichtelmann et al. (2001b). A partir das figuras isoladas não são possíveis, no entanto, conclusões sobre as causas dessas concentrações mais elevadas. Essas observações precisam ser feitas diretamente no local. Por meio da ajuda direcionada dessas informações cartográficas, podem ser feitas medições *in situ*, sendo que o volume de trabalho (mão-de-obra e custos) pode ser reduzido.

Mesmo que, com ajuda deste produto, possam ser identificadas a posição e a extensão de fenômenos interessantes relacionados ao conteúdo de clorofila do mar Báltico, por outro lado, é difícil para os cientistas que desenvolvem modelos, fechar as lacunas de dados, para poder efetivamente registrar a dinâmica natural de um sistema como o Báltico, derivar tendências e analisar as influências antrópicas. Uma grande seqüência de dados de clorofila como, por exemplo, nas datas

de 28.04., 08.05., 27.05. e 01.06.1999 bem como de 27.04., 02.05. e 16.05.2000 fornecem ao observador uma visão inicial da grande dinâmica do sistema mar Báltico.

### 24.3.2 Eventos seleccionados durante o monitoramento

Durante a elaboração rotineira do mapa da concentração de clorofila, ocorrem outros eventos singulares, além dos aumentos mencionados nas áreas de embocaduras de grandes rios, tal como ilustrado nas Figs. 24.2 e 24.3. Assim, por exemplo, os mapas datados de 06.5.2000 e 06.05.2001 apresentaram um nítido aumento da concentração de clorofila, no litoral oeste da Finlândia. Existem ainda aumentos significativos no mar Báltico central como, por exemplo, em 28.07.1999. Uma ocorrência especial foi o desastre do navio tanque a noroeste da península de Darss, em 29.03.1999. O conjunto de dados desta região do dia anterior mostra, em resolução maior na Fig. 24.4, como eles podem ser úteis na determinação da área afetada pela poluição com óleo, incluindo o monitoramento dos danos causados ao ecossistema. Infelizmente, um elevado grau de cobertura de nuvens impediu o registo de dados aproveitáveis durante a passagem seguinte do satélite. Independentemente disso, a Fig. 24.4 mostra concentrações de clorofila fortemente aumentadas a leste da ilha de Rügen (Alemanha) incluindo a região Greifswalder Bodden.



**Fig. 24.4** Concentração de clorofila na região da península de Darss, em 28.03.2002, um dia antes do desastre de um navio-tanque. O recorte passou ainda por uma correção inicial. No litoral leste da ilha de Rügen aparecem nitidamente valores mais elevados

## 24.4 Discussão

Os mapas das concentrações de clorofila do mar Báltico, como resultado de uma cadeia de processamento totalmente automática, fornecem uma boa visão geral na identificação de fenômenos interessantes, incluindo sua localização e extensão. A sua identificação, na maioria dos casos, é muito difícil, sem dados de sensoriamento remoto. Com esses mapas de clorofila deveria ser possível, não somente otimizar campanhas para medições *in situ* com o objetivo de esclarecer relações causais, mas também usá-los na pesca comercial e para o turismo.

No caso desse mapa de clorofila, trata-se de um produto totalmente especial de um sensor especial. Por meio da estruturação em módulos da cadeia de processamento, os algoritmos especiais poderiam ser trocados ou completados, para ampliar a paleta de produtos obtidos. Por exemplo, a inclusão de um algoritmo para a derivação de substância amarela (*Gelbstoff*) ou a troca do algoritmo atual de clorofila, por um algoritmo Case 1 e Case 2 (área litorânea e mar aberto) também é imaginável.

No entanto, o objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar, através de um exemplo demonstrativo, que a maior parte dos pré-requisitos técnicos está disponível, para transferir dados de sensoriamento remoto, desde a recepção do sinal numa estação em Terra até a distribuição de produtos de alto valor agregado a uma comunidade de usuários, num processo totalmente automático. Além dos outros pré-requisitos discutidos, como a utilização de algoritmos padronizados, ou a transição de enunciados qualitativos para quantitativos, o sensoriamento remoto somente se imporá pela sua operacionalidade. Apesar do *status* experimental do sensor MOS, com uma pequena faixa de imageamento de 200 km, além de um espaço de tempo relativamente grande para o imageamento completo da área do mar Báltico, das paradas técnicas para repouso do satélite e da não consideração dos diferentes tipos de águas, conforme mencionado, esta cadeia de processamento demonstra bem a execução operacional e automática de produtos com dados de alto valor. No momento está se trabalhando em outros procedimentos, como, por exemplo, na correção automática da atmosfera, utilizando, ao invés de atmosferas modelo, parâmetros da atmosfera derivados de diferentes dados de sensoriamento remoto de outros satélites (Holzer-Popp et al., 2001). Estão sendo envidados esforços também para o georreferenciamento automático desses dados.

Com o lançamento do sensor *Meris* (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo do satélite *Envisat* no final de 2001, foram eliminadas algumas das desvantagens do sensor MOS. Assim, p. ex., *Meris* apresenta uma faixa de imageamento de 1.150 km e permite, portanto, um recobrimento regional bem melhor. A recepção de dados também está planejada para a estação terrena em Neustrelitz para derivar, com base nos resultados do processador padrão da ESA com algoritmos especificados, produtos tanto para o mar aberto e o litoral, como para uso/cobertura do solo, atmosfera (nuvens, aerossóis) ou grandes corpos hídricos interiores, cobrindo uma região de 4.000 x 4.000 km (Fig. 24.5). Os algoritmos estão sendo desenvolvidos por diferentes instituições de pesquisa (DLR – Instituto de Métodos de Sensoriamento Remoto, Universidade Livre de Berlim, GKSS), sendo que os dados do MOS são usados para fins de calibração. A



**Imageamento terrestre (grade total: diária, semanal, mensal)**

- Classificação de uso/cobertura terrestre da Alemanha conforme legenda IGBP (anual)
- AVHRR comparável com NDVI

**Águas (mar Báltico, mar do Norte, lagos interiores: diária, mensal):**

- Clorofila
- Substância em suspensão
- Substância amarela (Gelbstoff)

**Atmosfera (rede total: diária, semanal, mensal):**

- Espessura óptica das nuvens
- Albedo das nuvens
- Pressão na superfície superior das nuvens
- Percentual de vapor d'água em coluna
- Profundidade óptica de aerossol fino e grosso
- Tipo de aerossol sobre a água
- Grau de cobertura de nuvens

**Fig. 24.5** Área de recepção da estação de Neustrelitz para o satélite *Envisat*, em diferentes elevações da antena. Para um quadrado de 4.000 x 4.000 km estarão disponíveis diferentes produtos *MERIS* do projeto *MAPP*

transposição dos algoritmos para um processador é efetuada pela empresa Brockmann Consult. Este processador é integrado a seguir na estação de recepção do DFD (Centro de Dados de Sensoriamento Remoto Alemão) em Neustrelitz numa cadeia de processos e atua na mesma, de onde também são depois distribuídos os produtos.

## 24.5 Agradecimentos

Os autores agradecem amavelmente ao Sr. Neumann (DLR, Instituto de Metodologia de Sensoriamento Remoto), à sua equipe e a H. Siegel (Instituto de Pesquisas do mar Báltico) pela sua boa cooperação no preparo da cadeia de processamento totalmente automática.

## 24.6 Referências Bibliográficas

- BROCKMANN, C. *Zur Nutzung des Thematic Mapper für die Ozeanographie*. Dissertation GKSS 93/EJ56, 1993.
- BROCKMANN, C.; DOERFFER, R.; FISCHER, J.; LÜDEKER, W.; NEUMANN, A.; SCHROEDER, M.; van der PIEPEN, H.; ZIMMERMANN, G. *Untersuchungen zu Sonderprodukten aus Daten des abbildenden Spektrometers MERIS auf ENVISAT*, Abschlussbericht, DARA: 50 EE 9511, 1996.
- BLASCHKE, Th. Fernerkundung im Naturschutz. Bedarf an operationellen Fernerkundungsmethoden durch die EU-Gesetzgebung, BfN-Skripten 42. In: *Proceedings of the Workshop Naturschutz und Fernerkundung*, Insel Vilm, 11-12.05.2000, Bonn 43-72, 2001.
- BORG, E. *Thesen zur Nutzung von Fernerkundungsdaten im Bereich des Kulturlandschaftsmonitorings*, internes Konzept, unveröffentlicht, 1999.
- FICHELTMANN, B.; BORG, E.; GUDER, H.-G.; KLISCH, A. Operational processing of MOS Data – the demonstrator "Chlorophyll Map of the Baltic Sea". In: *Proceedings of the 4th International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour*, Berlin, 30-31.05.2001a.
- FICHELTMANN, B.; BORG, E.; GÜNTHER A.; GUDER, H.-G.; REIMER R.; WOLFE, E.; DAMEROW, H. Chlorophyll map of the Baltic Sea – The result of an automatic processing chain from data reception up to archiving and delivery of value-added products. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, Trento, 13-14.09.2001b.
- GORDON, H. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans. *Applied Optics*, v. 17, n. 10, pp. 1631-1635, 1978.
- HOLZER-POPP, Th.; BITTNER, M.; BORG, E.; DECH, St.; ERBERTSEDER, Th.; FICHELTMANN, B.; SCHROEDTER, M. Das automatische Atmosphärenkorrekturverfahren "Durchblick". In: BLASCHKE, T. (Hrsg.) *Fernerkundung und GIS: neue Sensoren – innovative Methoden*, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 78-87, 2002.
- KRAWCZYK, H.; HETSCHER, M. Principal component inversion algorithm for the retrieval of water constituents and its application. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on MOS-IRS and ocean Colour*, Berlin, p. 7, 28-30.04.1997.
- KRAWCZYK, H.; NEUMANN, A.; WALZEL, Th. Interpretation Potential of marine environments multispectral interpretation. In: *Proceedings of the 3rd Thematic Conference in Remote Sensing for Environments*, Seattle, S.II, pp. 51-61, 18-20.09.1995.

- KRAWCZYK, H.; NEUMANN, A.; WALZEL, Th.; HETSCHER, M.; SIEGEL, H. *Application of a multispectral interpretation algorithm to remote sensing data over the Baltic Sea*. SPIE 2963, pp. 234-239, 1996.
- MISSLING, K.-D.; BETTAC, H.-D. *German Ground Segment for MOS-IRS and Ocean Colour*, Berlin, 28-30.04.1997.
- SATHYENDRANATH, S.; PRIEUR L.; MORAL, A. A three-component model of ocean colour and its' application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Internat. Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 8, pp. 1373-1394; 1989.
- SIEGEL, H.; GERTH, M.; BECKERT, M.; KRAWCZYK, H.; GERASCH, B. Distribution of water constituents derived from MOS-IRS data in the Southern Baltic Sea. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Workshop on MOS-IRS and Ocean Colour*, Berlin, p. 6, 28-30.04.1997.
- STURM, B. Ocean colour remote sensing and quantitative retrieval of surface chlorophyll in coastal waters using Nimbus CZCS data. *Marine Science 13, Oceanography from Space*. In: *Proceedings of the COSPAR/SCOR/IUCRM Symposium on Oceanography from Space*, Venice, 26-30 May 1980, Plenum Press, New York, pp. 267-279, 1981.
- WOLFF, E.; REIMER, E.; BORG, A.; GÜNTHER, B.; BARLUTH, B.; FICHTELMANN; PREUSS, H. Bereitstellung einer operationellen Chlorophyllkarte für die Ostsee. *ZPF*, v. 66 n. 5-6, 146-156, 1998.

## Imagens Quickbird Aplicadas ao Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata

Eduardo da Silva Pinheiro, Hermann Johann Heinrich Kux

### 25.1 Introdução

O desenvolvimento de satélites comerciais com sensores de alta resolução espacial originou, na comunidade de Geociências, diversas questões sobre a aplicação desses novos dados. Neste contexto, foi desenvolvido um estudo com o intuito de aplicar e avaliar imagens do satélite QuickBird, para mapear o uso/cobertura da terra, de um setor da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul: a área do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata, no Planalto.

As imagens do QuickBird bem como dos outros sistemas sensores de alta resolução, necessitam de novas metodologias de tratamento. Para corrigir as suas distorções é preciso ortorretificá-las e para a classificação digital de imagens, os classificadores convencionais do tipo *pixel a pixel*, não são adequados, sendo proposto o uso do método de classificação orientado a objetos. Não obstante, em função do grande volume de informações disponíveis, foi utilizada a interpretação visual para mapear o uso e cobertura da terra, na área de estudo.

### 25.2 A Mata Atlântica no Rio Grande do Sul

A Mata Atlântica constitui todo um conjunto de formações florestais localizadas na associação de serras litorâneas, desde o Rio Grande do Norte até o Estado do Rio Grande do Sul. Abrange um diversificado mosaico de ecossistemas florestais com estruturas e composições florísticas diferenciadas, acompanhando diferentes tipos de solos e relevos bem como características climáticas onde ocorrem (Rizzini, 1997).

Praticamente todos os ecossistemas do domínio da Mata Atlântica se encontram em terras gaúchas: florestas ombrófila densa, ombrófila mista, estacionais decíduais e semidecíduais, campos e restinga (Marcuzzo et al., 1998). A Fig. 25.1 apresenta a Mata Atlântica no RS em suas diferentes zonas e categorias de uso.

Tendo sofrido os efeitos da ocupação pela imigração e posterior exploração madeireira, como os demais Estados do Brasil, os remanescentes da Mata Atlântica no RS tem uma extensão de tão-somente 2.130.885 hectares, ou seja, 7,9% da área do Estado (Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2002).

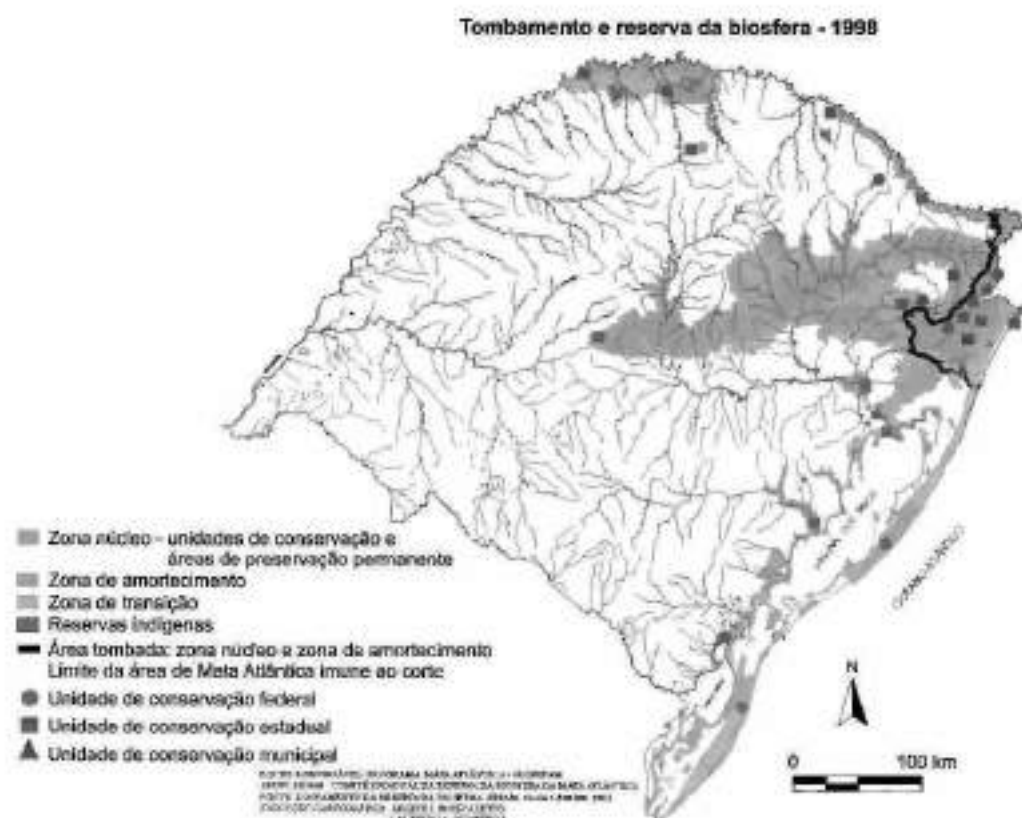


Fig. 25.1 Mata Atlântica no Rio Grande do Sul. Fonte: FEPAM/RS, 2002

### 25.3 O Satélite QuickBird

O satélite QuickBird foi projetado e construído através da cooperação entre as empresas norte-americanas DigitalGlobe, Ball Aerospace Technologies, Kodak e Fokker Space. Foi lançado em órbita da Terra em outubro de 2001. A Tab. 25.1 apresenta as suas especificações técnicas.

O QuickBird possui sensores do tipo CCD (*Charge Coupled Device*), que realizam varredura eletrônica em fileira linear (*pushbroom linear array*) flexíveis para visadas *off-nadir* até 30°, ao longo do terreno imageado (Petrie, 2002). A visada *off-nadir* permite a cobertura mais freqüente do terreno e a aquisição de pares estereoscópicos. O sistema sensor do satélite captura imagens no modo pancromático (PAN) e multiespectral (MS). A Fig. 25.2 apresenta as faixas espectrais das imagens QuickBird.

A DigitalGlobe disponibiliza imagens nas formas PAN, MS e uma imagem denominada *Pan-sharpened* que possui 0,70 m de resolução, uma composição colorida natural ou falsa-cor. As imagens PAN e MS são adquiridas com 11 bits, mas podem ser fornecidas em 8 bits ou 16 bits.

Os dados coletados pelo QuickBird são captados por duas estações em Terra: (*Fairbanks*, Alasca, EUA) e (*Trondheim* (Noruega)). A partir dessas estações, os dados são enviados para o centro de processamento da DigitalGlobe no Colorado, EUA. A Tab. 25.2 apresenta a descrição dos produtos comercializados.

Tab. 25.1 Especificações técnicas do QuickBird

Altitude da órbita	450km
Órbita	97,2° Sol-síncrona
Sentido da órbita	Descendente 10:30 a.m.
Tempo de revista	1 - 3,5 dias (dependendo da latitude)
largura da faixa imageada	18,5km (nadir) 20,8km (off-nadir)
Resolução espacial (nominal)	0,61m (nadir) Pancromática 2,44m (nadir) Multiespectral 0,72m (25° off-nadir) Pancromática 2,88m (25° off-nadir) Multiespectral
Resolução espectral	Pancromático: 0,45 - 0,90 $\mu\text{m}$ Azul: 0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ Verde: 0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$ Vermelho: 0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ Infravermelho próximo: 0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$
Resolução radiométrica	11 bits (2048 níveis de cinza)

Fonte: Adaptada de DigitalGlobe (2003)

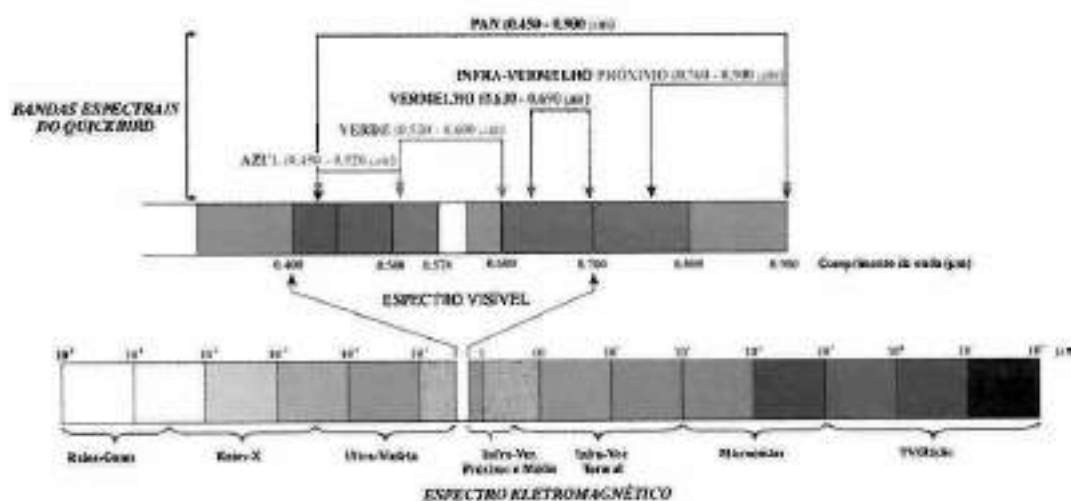


Fig. 25.2 Bandas do QuickBird no espectro eletromagnético

Junto com os produtos QuickBird estão disponíveis os arquivos contendo os dados de suporte à imagem (*Image Support Data – ISD*). Os ISD possuem as informações necessárias para a correção geométrica das imagens, os coeficientes racionais polinomiais (RPC), calculados a partir de informações da câmara do sensor e da órbita do satélite (Gerlach, 2002).

## 25.4 A Classificação Orientada ao Objeto

Ao contrário dos métodos tradicionais para a classificação digital de imagens, na classificação orientada ao objeto, a análise é realizada sobre objetos ou segmentos da imagem e não apenas sobre *pixels*. Numa imagem, um objeto representa uma entidade que pode ser



Tab. 25.2 Produtos do satélite QuickBird

	CE1 90%	RMS <sup>2</sup>	DESCRIÇÃO
Basic	23,0m*	14m*	Com correção radiométrica e relativa dos detectores, geometria interna do sensor. Possui o menor processamento
Standard	23,0m*	14m*	Disponibilizada com uma Projeção Cartográfica e Datum
Orthorectified RPC**	12,7m	7,7m	Imagem ortoretilificada
Orthorectified Efeimérides	10,2m	6,2m	Imagem ortoretilificada
Basic Stereo	23m	14m	Imagem adquirida 30° off-nadir, possui 90° de recobrimento

\* Excluindo a geometria de visada e a distorção do relevo. Fonte: Adaptada de DigitalGlobe (2003)

individualizada, tem atributos próprios e as mesmas propriedades da classe que lhe deu origem (Definiens, 2002).

Gonçalves et al. (2001) apresentam duas justificativas para se adotar a classificação orientada ao objeto: 1. O processamento de imagens está mais próximo dos processos cognitivos humanos do que de classificações baseadas em *pixel*; 2. As informações contextuais com significado podem ser incorporadas mais facilmente numa abordagem orientada ao objeto, do que numa abordagem *pixel a pixel*.

Dentre os aplicativos disponíveis no mercado, destaca-se o *eCognition Sistema de Análise de Imagens Orientado ao Objeto* da empresa alemã Definiens, que tem sido utilizado no processamento de imagens dos novos sistemas sensores com alta resolução espacial. Para a classificação digital, o *eCognition* considera, além do nível de cinza, a forma, a textura, funções de SIG (tamanhos de borda de objetos, suas relações topológicas). O processamento de imagens através do *eCognition* é efetuado a partir de uma segmentação, construção de uma hierarquia de classes e a classificação. Schwarz et al. (2002) resumem o modelo de classificação da imagem orientado ao objeto como segue: segmentação da imagem em diferentes níveis com distintos detalhes; definição da hierarquia de classe e descrição da classificação; classificação da imagem com base na hierarquia de classes; segmentação da imagem seguida de classificação, análise e apresentação da exatidão temática da classificação.

#### 25.4.1 A segmentação multirresolução

Segundo Hoffmann (2000), o aplicativo *eCognition* baseia-se na Aproximação de Evolução da Rede Fractal (*Fractal Net Evolution Approach*), adotando uma rede semântica para otimizar os objetos segmentados. Uma rede semântica constitui uma estrutura lógica que relaciona os objetos ou classes de acordo com os seus significados e relações (Antunes, 2003).

A segmentação multirresolução utilizada pelo *eCognition*, representa um novo conceito que realiza a fusão de regiões (*region merging*) e agrupa os setores da imagem par a par. Inicialmente um *pixel* individual é considerado um objeto da imagem ou de uma região. Nos passos seguintes, pequenos objetos da imagem são agregados, gerando outros maiores. Em cada passo, o par adjacente do objeto da imagem é fundido segundo um patamar de crescimento definido para a heterogeneidade. O processo ocorre segundo um critério de homogeneidade, descrevendo a semelhança dos objetos vizinhos.

A decisão de se agrupar ou não um *pixel* é tomada pelo grau de homogeneidade (GH). Os *pixels* ou objetos são associados se o GH calculado for inferior ao Parâmetro Escalar. O parâmetro escalar determina a heterogeneidade máxima dos objetos e influencia no seu tamanho (Definiens, 2002). O uso de diferentes parâmetros escalares determina distintos níveis de segmentação.

#### 25.4.2 A rede hierárquica de objetos na imagem

As diferentes formas de segmentação no eCognition podem ser utilizadas para construir uma rede hierárquica de objetos na imagem, os quais podem representar simultaneamente imagens com diferentes resoluções espaciais. Os objetos na imagem são estruturados em rede e deste modo cada objeto "conhece" os seus vizinhos e subobjetos.

Na rede hierárquica a topologia é definida; p. ex., a borda de um superobjeto tem consistência com a borda de seus sub-objetos. Nessa rede, os objetos da imagem podem apresentar estruturas com diferentes escalas representadas simultaneamente e, desta forma, classificar uma em relação à outra, os diferentes níveis de hierarquia podem ser segmentados baseados em dados distintos. A rede hierárquica de classes representa a base do conhecimento para que cada classe seja associada a atributos do "mundo real" (Definiens, 2002).

#### 25.4.3 A classificação através do eCognition

O processamento de imagens orientadas ao objeto baseia-se em classificadores *fuzzy*. A lógica *fuzzy* é uma aproximação matemática para quantificar declarações incertas (Definiens, 2002). A lógica *fuzzy*, segundo Burrough e McDonnell (1998) é indicada sempre que for necessário trabalhar com ambigüidade e abstração em modelos matemáticos ou conceituais nos quais, por distintas razões, não há ou não se podem definir limites rígidos entre classes.

Para classificar a imagem, o eCognition possui dois classificadores, o Vizinho-mais-próximo (*Nearest Neighbors*) e as Funções *Fuzzy* de Pertinência (*Fuzzy Membership Functions*), além da classificação manual. O vizinho-mais-próximo classifica os objetos da imagem num dado espaço de características e utiliza áreas de treinamento para as classes. As funções *fuzzy* de pertinência possibilitam discriminar os objetos que devem pertencer ou não, a uma determinada classe com um grau de pertinência. Para tanto, os objetos são transformados numa gama de valores num intervalo contínuo entre [0...1]. Após a definição das funções de pertinência, a lógica *fuzzy* pode ser aplicada por meio de operadores.

### 25.5 Exatidão de Mapeamento

Na confecção de mapas é necessário informar a sua exatidão, que pode ser medida por meio de dois critérios: exatidão geométrica e temática. A exatidão geométrica refere-se ao grau de ajuste dos objetos no mapa em relação à sua posição no terreno. A exatidão de classificação temática refere-se ao grau de associação entre os objetos mapeados e a realidade do terreno (Congalton e Green, 1999).

#### 25.5.1 Exatidão geométrica

A avaliação da geometria de uma imagem é expressa por meio das geometrias interna e externa. A geometria interna indica o grau de similaridade entre a imagem e o terreno nela

representado. Já a geometria externa estabelece a exatidão das coordenadas da imagem em relação a um determinado referencial (Ford e Zanelli, 1985).

As imagens de satélite podem apresentar uma série de distorções espaciais, além de não conter com exatidão cartográfica os objetos nelas representados. Estas distorções estão associadas ao modelo orbital do satélite, plataforma, propriedades do sensor, rotação e curvatura da Terra, além dos efeitos topográficos (Schowengerdt, 1997). As deformações oriundas da topografia normalmente geram grandes erros em mapas (Ford e Zanelli, 1985).

As distorções geométricas podem ser eliminadas ou reduzidas, por meio de modelos de correção geométrica. O processo de correção das imagens é necessário para realizar medições sobre elas, além de integrar-lhes outros dados. Existem três modelos principais para a correção geométrica de imagens: Modelo Polinomial, Modelo Função Racional e Modelo Rigoroso. O modelo polinomial é o mais simples, pois não considera a elevação do terreno, as informações sobre a posição do satélite ou do sensor. O modelo função racional (RFM) utiliza pontos de controle, um modelo digital de elevação (MDE) e os RPC. Para utilizar o RFM é preciso uma razoável quantidade de pontos de controle, que não eliminam completamente as distorções. O modelo rigoroso leva em consideração as informações do satélite e do sensor, reflete a realidade física da geometria de visada e corrige as distorções da plataforma (Tourin e Cheng, 2000; Tao e Hu, 2001).

No processo de correção geométrica das imagens há quatro elementos principais que influenciam a qualidade final do produto: modelo aplicado na correção; qualidade, quantidade e distribuição dos pontos de controle; relevo da área de estudo; qualidade do MDE.

### 25.5.2 Exatidão temática

Um mapa temático precisa apresentar o seu grau de confiabilidade, assim é indispensável considerar e definir sua exatidão estatística. Existem várias técnicas estatísticas para avaliar a exatidão do mapeamento. Na matriz de erros, os *pixels* classificados de forma correta e errada são analisados em termos de distribuição percentual. O seu objetivo é fornecer dados que permitam ajustar as áreas das classes obtidas por uma classificação, calcular os parâmetros de exatidão global da classificação e identificar os erros específicos que afetam cada uma das classes (Congalton e Green, 1999).

A matriz de erros descreve as exatidões individuais de cada categoria do mapa, em conjunto com os erros de inclusão e de omissão (Congalton e Green, 1999). A estatística mais simples derivada da matriz de erros é a exatidão global ( $P_0$ ), conforme Eq. 25.1:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{N} \quad (25.1)$$

onde:

- N – nº total de unidades amostrais considerado pela matriz;
- $n_{ii}$  – elementos da diagonal principal (nº de *pixels* corretamente classificados);
- k – nº de categorias presentes na matriz de erro (1...c).

O erro de inclusão ocorre quando uma área é abrangida numa classe à qual ela não pertence. Já o erro de omissão acontece quando uma área é excluída de uma classe à qual pertenceria.

A matriz de erros permite utilizar técnicas de análise multivariada para determinar a concordância entre o levantamento de campo e o mapa obtido pela classificação. A estatística *Kappa* é um método muito utilizado na análise da exatidão de mapas temáticos. O *Kappa* ( $K$ ) inclui no cálculo do seu coeficiente todos os elementos da matriz de erros e não apenas os elementos da diagonal principal (Congalton e Green, 1999):

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r n_{ii} - \sum_{i=1}^r (n_{i+} + n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (n_{i+} + n_{+i})} \quad (25.2)$$

onde:

$r$  – nº de linhas da matriz quadrada;

$n_{ii}$  – nº de observações na linha  $i$  e da coluna  $i$  respectivamente;

$N$  – representa o número total de observações.

O valor da estatística *Kappa*, determinado pela Eq. 25.2 foi comparado aos valores contidos na Tab. 25.3, desenvolvida por Landis e Koch (1977).

Tab. 25.3 Qualidade da classificação e valores da estatística Kappa

VALOR DE KAPPA	QUALIDADE DO MAPA TEMÁTICO
< 0,00	Péssima
0,00 0,20	Ruim
0,20 0,40	Razoável
0,40 0,60	Bom
0,60 0,80	Muito bom
0,80 1,00	Excelente

Fonte: adaptada de Landis e Koch (1977)

## 25.6 O Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata (CPCN)

O CPCN Pró-Mata foi criado em 1994 a partir da cooperação entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) e a Universidade alemã de *Tübingen*. Um dos principais objetivos do CPCN Pró-Mata é desenvolver projetos e ações que visam à proteção e à recuperação dos ecossistemas, para interligar os maciços florestais remanescentes, criar corredores naturais de vegetação, importantes para a manutenção da diversidade biológica da Mata Atlântica (Bertoletti, 1995).

O CPCN Pró-Mata possui uma área de 4.477,7246ha, está localizado no Planalto das Araucárias, entre as coordenadas S 29° 26' 17" a 29° 34' 42" e W 50° 08' 14" a 50° 14' 18" (Fig. 25.3). Este trabalho foi mapeado do CPON-Pró-Nata e seu entorno, totalizando 15.288,7900 ha.

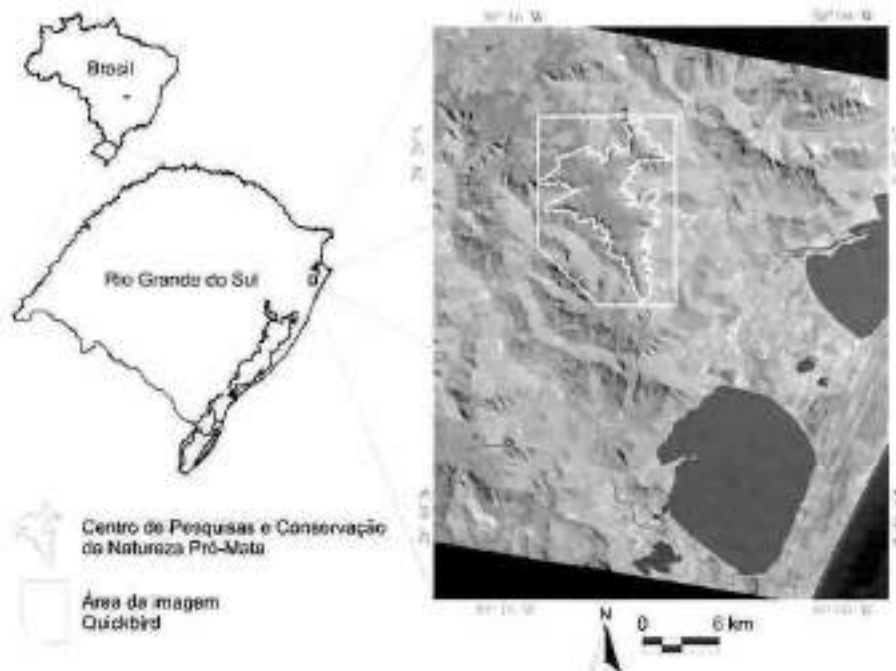


Fig. 25.3 Localização da área de estudo.

## 25.7 Materiais e Equipamentos

Para mapear o CPCN Pró-Mata foram utilizados os seguintes produtos de SR e dados cartográficos:

1) Imagem do QuickBird tipo *Standard*, adquirida em 27/08/2002, *off-nadir* 14°01'38.64", 16 bits, uma imagem PAN (resolução espacial de 0,70 m) e quatro imagens MS (resolução espacial de 2,8 m) com correções radiométricas, do sensor, e geométricas, designadas para a projeção UTM e datum WGS 84, não ortoretificadas. Foram fornecidos também os arquivos ISD contendo os RPC.

2) Curvas de nível com equidistância de 20 m disponíveis em meio digital, obtidas a partir de cartas topográficas na escala 1/50.000.

Os equipamentos utilizados neste trabalho foram:

1) Dois receptores GPS MARCH II MOTOROLA (aquisição e identificação dos pontos de controle em campo);

2) Computador AMD Athlon XP processador 1,5 GB, 320 memória RAM, HD 30 Gbits, sistema operacional Windows 2000 (processamento e análise dos dados);

3) Os seguintes aplicativos para SR e SIG foram utilizados:

- PC - CMT GPS para o processamento dos pontos de controle adquiridos com DGPS;
- Erdas 8.5, módulos *Interpreter*, *DataPrep*, *OrthoBase*, *VirtualGIS* para a geração do MDE e correção geométrica das imagens;
- eCognition Object-Oriented Image Analysis 2.1* para a classificação digital das imagens;
- Sistema de processamento de informações georreferenciadas – *SPRING* para a criação do banco de dados geográficos e interpretação visual das imagens.

## 25.8 Metodologia

De acordo com os objetivos propostos neste estudo, que enfatizam o mapeamento do uso e cobertura da terra, a metodologia adotada foi dividida em etapas distintas, porém complementares. A Fig. 25.4 apresenta um fluxograma da metodologia usada no desenvolvimento do trabalho.

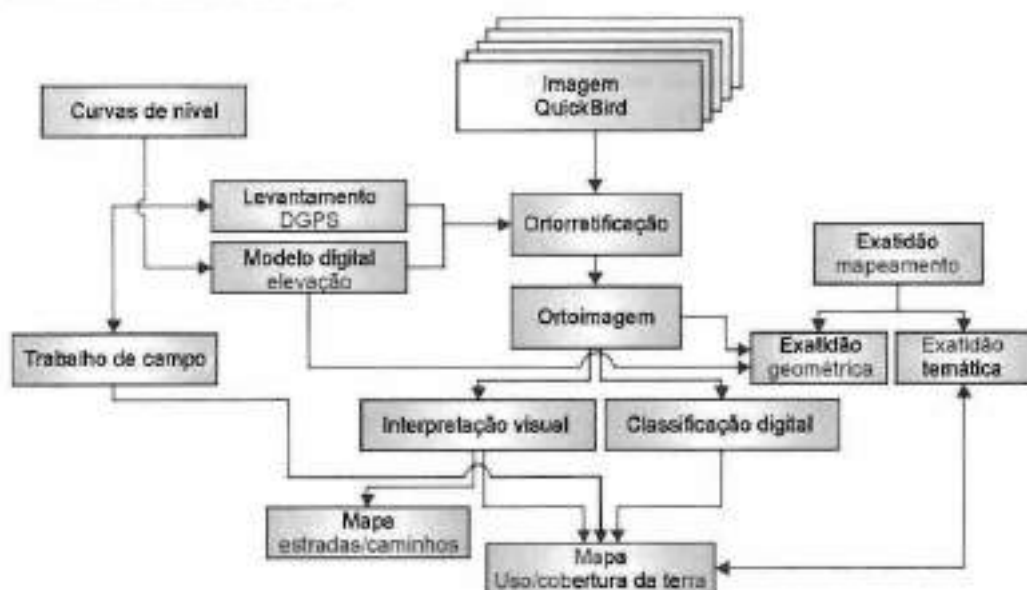


Fig. 25.4 Fluxograma da metodologia usada

A metodologia usada para corrigir as distorções na imagem QuickBird seguiu os passos descritos por Tao e Hu (2001); McCarthy et al. (2002); Toutin e Cheng (2002). O modelo função racional foi utilizado para ortorretificar as imagens. Para isto, foram utilizados 30 pontos adquiridos com DGPS, modelo digital de elevação (MDE) (curvas de nível com equidistância de 20m) e os dados RPC. Inicialmente fez-se a correção geométrica da imagem PAN QuickBird e posteriormente das imagens MS.

As imagens do QuickBird PAN e MS (R, G e B) foram fundidas antes do processo de ortorretificação, para garantir que não haveria deslocamento entre elas. Visando a otimizar o tempo de processamento e tornar operacional o uso das imagens, elas foram reescaladas de 16 para 8 bits.

No processo de ortorretificação das imagens MS, a imagem PAN serviu como referência para adquirir os pontos de controle. A imagem-fusão foi ortorretificada através do projeto criado para a PAN, trocando-se apenas as imagens. Isto foi possível porque as duas imagens (PAN e Fusão) possuem a mesma resolução espacial.

Para mapear o uso/cobertura da terra da área de estudo foram considerados os mapas de vegetação do Pró-Mata criados por Bertolotti (1995) e Baaske (1999). A legenda do mapa baseou-se no IBGE (1992 e 1999), com pequenas adaptações. A classificação da vegetação foi fisionômico-ecológica, adotando-se uma hierarquia para os critérios ecológicos e fisionômicos da vegetação. Quanto ao uso da terra, mapearam-se principalmente as atividades antrópicas como agricultura, pastagens, povoados, construções, sedes de propriedades rurais e reflorestamentos.

Para a classificação digital das imagens QuickBird foi utilizada a metodologia de classificação orientada ao objeto, descrita por Hoffmann (2000) e Schwarz et al. (2002). O processamento de imagens no eCognition seguiu três etapas: segmentação, construção de uma hierarquia de classes e classificação. Para segmentar as imagens, utilizou-se o método da segmentação *multirresolução*. As imagens foram segmentadas em três níveis, com diferentes parâmetros escalares, além de distintos critérios de homogeneidade. Em todas as bandas processadas aplicou-se o peso 1. Na Tab. 25.4 encontram-se os parâmetros utilizados nas segmentações.

Tab. 25.4 Parâmetros usados para a segmentação da imagem

NÍVEL DE SEGMENTAÇÃO	PARÂMETRO ESCALAR	CRITÉRIO DE HOMOGENEIDADE			
		COR	FORMA		
			SUAVIZAÇÃO	COMPACTAÇÃO	
1°	250	0,7	0,3	0,6	0,4
2°	150	0,8	0,2	0,6	0,4
3°	15	0,2	0,8	0,6	0,4

No primeiro nível de segmentação utilizou-se um parâmetro escalar igual a 250 e um critério que privilegiou a homogeneidade da cor dos objetos. Na segmentação do segundo nível, de modo análogo ao anterior, foi privilegiada a cor dos objetos. No terceiro nível o parâmetro escalar foi mais fino, buscando separar pequenos objetos perceptíveis nas imagens. Ao final deste processo foram criadas três imagens segmentadas que apresentam distintos níveis de segmentação.

Posteriormente foi criada uma hierarquia de classes que considerou a legenda de mapeamento definida anteriormente. O passo seguinte foi a classificação das imagens, testando-se os dois classificadores implementados no eCognition: o Vizinho-mais-Próximo e o Funções *Fuzzy* de Pertinência. O primeiro classificador exige a aquisição de amostras para as classes mapeadas. Já para o classificador por funções *fuzzy* de pertinência é necessário estabelecer descritores para a discriminação das classes temáticas. Os descritores aplicados foram baseados em valores espectrais, de forma, vizinhança e textura.

Uma nova hierarquia de classes foi criada devido à dificuldade em separar as classes definidas anteriormente. Agruparam-se determinadas classes para facilitar o seu mapeamento. A

nova hierarquia de classes ficou definida da seguinte forma: Floresta, Campo, Área Antropizada, Reflorestamento, Sombra e Água. Nesta etapa também foram testados os dois classificadores do eCognition.

Os testes com a classificação digital das imagens QuickBird não apresentaram sucesso, segundo a legenda definida. Os trabalhos de campo apontavam para uma grande variedade de uso e cobertura da terra na área, que puderam ser identificadas nas imagens de satélite. Para mapear com maior fidelidade a área foi usada a interpretação visual de imagens, e as classes digitalizadas na tela do computador.

A análise da exatidão temática foi aplicada no mapa de uso/cobertura da terra criado a partir da interpretação visual. Criou-se uma matriz de erros e calcularam-se a exatidão global, o índice *Kappa* e os erros de inclusão e omissão. Como verdade de campo foram utilizados 134 pontos distribuídos aleatoriamente em toda a área estudada.

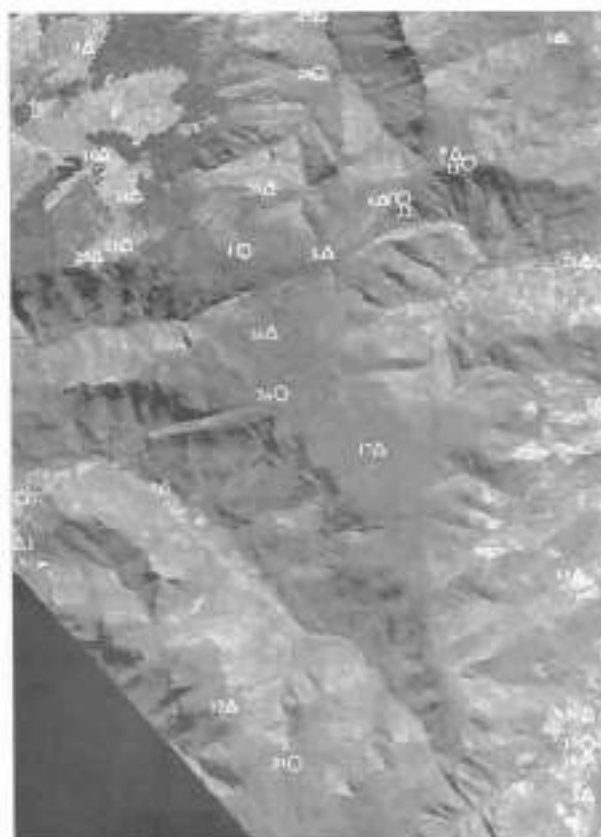
## 25.9 Resultados e Discussões

Na correção geométrica das imagens QuickBird o erro médio quadrático (EMQ) total para a imagem PAN foi de 3,2181 *pixel*, utilizando-se 21 pontos de controle e 9 pontos para teste. A Fig. 25.5 apresenta a distribuição dos pontos utilizados na ortorretificação da imagem.

As Tabs. 25.5 e 25.6 apresentam os EMQ e o erro máximo para os pontos de controle e de teste.

Para as imagens MS QuickBird o EMQ total foi de 0,4316 *pixel*, para 22 pontos de controle e 1 ponto de teste. Os resultados da ortorretificação da imagem fusão são idênticos aos da imagem PAN, pois ambas possuem a mesma resolução espacial.

Os resultados da correção geométrica desta área indicam que, conforme a resolução nº 89.817 de 20/06/1984, as imagens QuickBird podem ser utilizadas na escala 1:15.000 PEC Classe A.



△ Ponto de Controle    ○ Ponto de Teste

Fig. 25.5 Distribuição dos pontos de controle e para teste



**Tab. 25.5** EMQ das pontos de controle

EMQ (PIXEL)		ERRO MÁXIMO (PIXEL)	
X	Y	X	Y
2,11	2,72	-4,05	-3,87

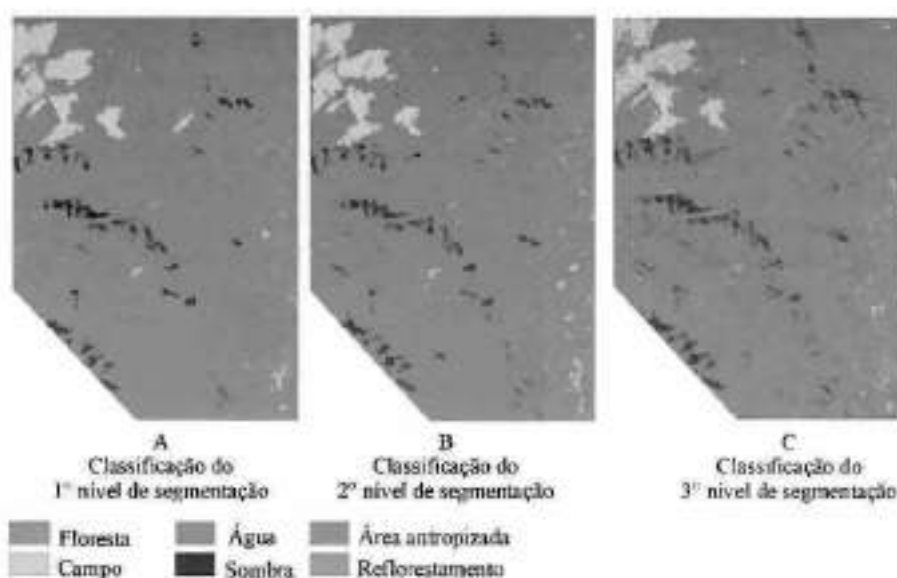
**Tab. 25.6** EMQ dos pontos de teste

EMQ (PIXEL)		ERRO MÁXIMO (PIXEL)	
X	Y	X	Y
2,62	3,23	-3,76	7,12

O processo de segmentação realizado pelo eCognition apresentou resultados satisfatórios, quanto ao seu tempo de processamento e a qualidade da segmentação. Não obstante, verificou-se que a versão do eCognition (2.1) utilizada não permitiu a análise quantitativa da qualidade da segmentação. Também devido a problemas operacionais na versão do aplicativo disponível, utilizaram-se apenas as imagens MS QuickBird.

Os resultados obtidos com os classificadores implementados no eCognition, para as classes definidas, não foram satisfatórios considerando os objetivos propostos. O classificador vizinho-mais-próximo apresentou os melhores resultados, por sua possibilidade de aquisição de amostras para as classes temáticas. A Fig. 25.6 apresenta os resultados obtidos com a classificação das imagens, considerados, porém, insatisfatórios.

Na Fig. 25.6A observa-se que as classes campo e floresta foram bem distinguidas, enquanto a classe reflorestamento apresentou confusão com floresta. Nos três níveis de

**Fig. 25.6** Resultados do classificador vizinho-mais-próximo nos diferentes níveis de segmentação

segmentação as classes campo e área antropizada apresentaram conflitos. A classificação do terceiro nível de segmentação (Fig. 25.6C), na qual o parâmetro escalar foi mais fino, em diversos pontos da imagem pequenos segmentos foram classificados como área antrópica, principalmente dentro das classes floresta e campo.

Avaliou-se que a dificuldade de discriminação das classes temáticas é devida à grande heterogeneidade das feições mapeadas. A solução encontrada para o mapeamento do uso/cobertura da terra foi a interpretação visual, assumindo-se que estes procedimentos de análise de imagem possuem um certo grau de subjetividade.

Após inúmeros testes com o classificador orientado ao objeto com resultados inferiores ao desejado, optou-se pela interpretação visual da imagem. A base para o mapeamento do uso/cobertura da terra foi uma imagem-fusão. Também foram utilizadas as imagens dos canais individuais, além de composições em falsa-cor, principalmente usando o canal infravermelho próximo. Posteriormente, foi avaliada a exatidão temática do mapeamento através da matriz de erros (Tab. 25.7), a exatidão global, o índice *Kappa* e os erros de omissão e comissão.

Tab. 25.7 Matriz de Erros

		CLASSES MAPEADAS															Total	Omissão
		Sp	FM	Ac	Pa	C	FD	Cs	Cr	Rp	Mta	Ssc	Ar	Scoa	Ca	Pu		
Classes observadas em campo	Sp	7			1												8	12,5%
	FM		31									2					33	6,1%
	Ac			10													10	0%
	Pa				17												17	0%
	C					20	1										21	4,8%
	FD						20										20	0%
	Cs							12									12	0%
	Cr								15					1			16	6,3%
	Rp									6							6	0%
	Mta										6						6	0%
	Ssc										2	26	1				29	10,3%
	Ar													4			4	0%
	Scoa					2									31		33	6,1%
	Ca													2	5		7	28,6%
	Pu															15	16	0%
	<b>Total</b>		7	31	10	18	22	20	13	15	6	8	26	4	35	5	15	<b>238</b>
Comissão		0%	0%	0%	5,6%	9,1%	0%	7,7%	0%	0%	25%	7,1%	0%	11,4%	0%	0%		

A exatidão global foi de 0,95 e o índice *Kappa* de 0,94, valores considerados excelentes quando comparados com a tabela de qualidade da classificação, propostos por Landis e Koch (1977). No que se refere aos resultados obtidos na análise quantitativa da exatidão temática, deve-se ressaltar que os pontos utilizados como verdade terrestre foram obtidos por meio de amostragem aleatória e que, por dificuldade de acesso à área e de tempo do trabalho de campo, três classes temáticas não foram amostradas, a saber: Capoeira rala, Solo exposto e Reflorestamento de *Eucalyptus sp.* Os pontos de verdade terrestre não foram utilizados durante a realização do mapeamento, tendo servido apenas para testar a qualidade do mapa. A Fig. 25.7 apresenta o mapa gerado.

CENTRO DE PESQUISAS E CONSERVAÇÃO DA NATUREZA PRÓ-MATA  
 MAPA DE USO/COBERTURA DA TERRA

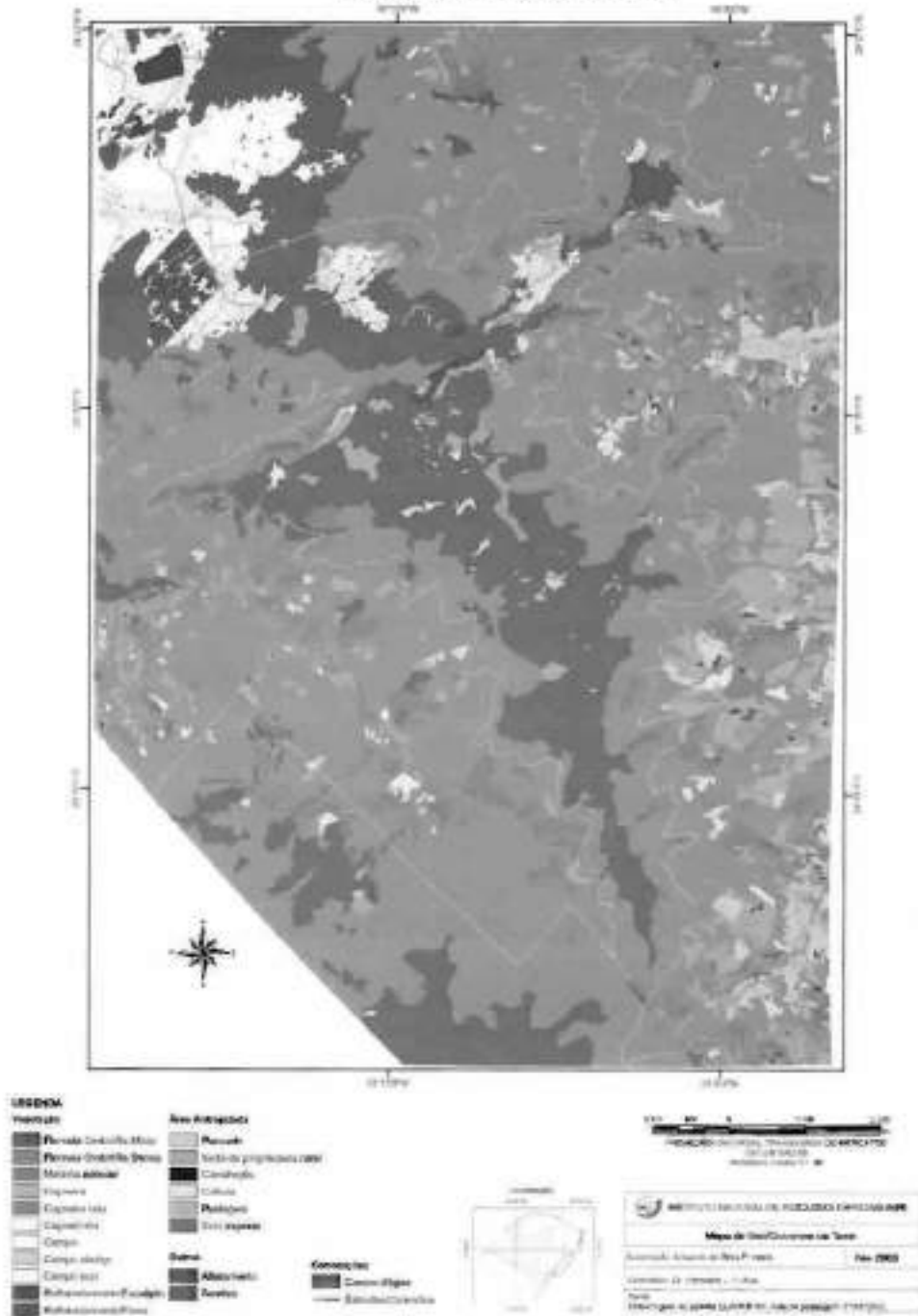


Fig. 25.7 Mapa de uso/cobertura CPCN Pró-Mata

Tab. 25.8 Classes mapeadas e área de abrangência

	CLASSE TEMÁTICA	SÍMBOLO	ÁREA (ha)	%
Formação florestal	Floresta ombrófila densa	FD	8.745,7787	57,18
	Floresta ombrófila mista	FM	2.725,6684	17,62
	Matinha nebular	Mta	256,3530	1,69
Formação campestre	Campo	C	649,8890	4,25
	Campo sujo	Cs	157,9331	1,03
	Campo alagadiço	Ce	14,4243	0,09
Sucessão secundária	Capoeirinha	Sca	213,9090	1,40
	Capoeira rala	ScaR	539,6632	3,53
	Capoeira	Sca	539,7420	3,53
Área antropizada	Povoado	Pu	134,6947	0,88
	Sede de propriedade rural	Sp	118,1118	0,77
	Construções	Cr	2,2791	0,01
	Agricultura	Ac	206,9475	1,35
	Pastagem	Pa	524,1885	3,43
	Solo exposto	Se	54,0760	0,35
	Reflorestamento <i>Pinus</i> spp	Rp	139,7433	0,91
	Reflorestamento <i>Eucalyptus</i> spp	Re	25,4029	0,17
	Afloramento rochoso	Ar	51,9983	0,35
	Sombra	S	191,5669	1,25
<b>Total</b>			<b>15.280,7900</b>	

### 25.9.1 Formação florestal

Na área mapeada predomina a floresta ombrófila densa (57,18%), ocorrendo também a floresta ombrófila mista e a matinha nebular. A floresta ombrófila densa, constituída por plantas lenhosas, geralmente com os brotos foliares sem proteção contra a seca, localiza-se ao longo das encostas e escarpas, chegando até o fundo dos vales. Apresenta uma grande heterogeneidade de espécies constituídas por epífitas, lianas, xaxins, arbustos, bem como árvores médias e altas. Em algumas seções, na Reserva Biológica da Serra Geral, há indivíduos com até 40m de altura.

A floresta ombrófila mista se concentra principalmente no planalto, em locais com relevo suave-ondulado a ondulado, chegando até a sua borda em contato com a floresta ombrófila densa. O seu estrato superior é dominado pela *Araucaria angustifolia*, uma espécie que foi facilmente identificada nas imagens do QuickBird, em razão de sua copa bem característica. Dentre as espécies presentes nessa floresta, identificaram-se a imbuia (*Ocotea porosa*) e o xaxim-bugio (*Dicksonia sellowiana*), espécies ameaçadas de extinção no Brasil (Bertoletti, 1995; Mantovani e Silva, 2002). Em conjunto com os pinhais, também se verifica um grande número de espécies da família das *Myrtaceae* e *Melastomataceae*.

A matinha nebular é assim denominada devido a sua fisionomia composta por arbustos e arvoretas com tamanhos entre pequenos a médios. Nas imagens do QuickBird esta formação aparece com textura lisa, localizada na transição entre a floresta ombrófila mista no planalto e a floresta ombrófila densa das encostas íngremes. Nesta formação ocorrem mirtáceas, ericáceas dos gêneros *Leucothoë*, *Gaylussacia* e *Tibouchina*.

### 25.9.2 Formação campestre

A fisionomia herbácea domina na formação campestre, compreendida principalmente por gramíneas, ciperáceas, compostas, leguminosas e euforbiáceas. Embora essa formação possa induzir uma idéia de homogeneidade quanto às espécies, os campos apresentam uma grande diversidade (Mantovani e Silva, 2002). No mapeamento identificaram-se três formações campestres, a saber: campo, campo sujo e campo alagadiço. Os campos ocupam os setores com as maiores altitudes, onde o relevo é suave-ondulado a ondulado e o solo é pouco espesso, com presença de afloramentos rochosos. Associado aos campos, em determinados locais observa-se a presença de capões com ocorrência da *Anacaria angustifolia*.

O campo sujo ocupa pequenos setores dentro da área do Pró-Mata. A diferença fisionômica entre campo e campo sujo é que neste último há pequenos arbustos, ervas ciperáceas e gramíneas. Nas imagens do QuickBird esta diferenciação é bem perceptível pela cor clara do campo e mais escura do campo sujo.

Os campos alagadiços aparecem em clareiras localizadas dentro da floresta ombrófila mista, ou próximo aos campos e capoeirinhas. Identificou-se espécies de *Xyris*, *Juncos* e *Eriocaulon*. No setor sul do Pró-Mata, os campos alagadiços inseridos no meio da floresta ombrófila mista possuem uma lamina d'água que atinge uma profundidade de até 40 cm.

### 25.9.3 Sucessão secundária

Utilizando elementos de fotointerpretação e observações de campo, foram discriminados três estágios de sucessões secundárias: Capoeirinha, Capoeira rala e Capoeira.

A capoeirinha localiza-se no planalto sobre o relevo suave-ondulado a ondulado, também está presente na meia encosta e no fundo dos vales. Ocorrem inúmeras espécies da família das compostas e, entre as espécies mais comuns, verifica-se o *Baacharis sp* (vassorão-bravo). A capoeira se localiza na baixa e média encosta, com presença de *Baacharis sp*, sendo comuns espécies lenhosas e sublenhosas, arvoretas que chegam a 3 m de altura. A capoeira está localizada no planalto, especialmente na área do Pró-Mata, podendo ser encontrada também no fundo dos vales e nas encostas com declividade máxima de 30°. A capoeira também ocorre próxima aos caminhos abertos na mata. A vegetação é formada por pequenas árvores de troncos finos, com alturas que chegam no máximo a 10 m.

### 25.9.4 Área antropizada

As áreas antropizadas incluem as seguintes classes temáticas: Povoado, Sede de propriedade rural, Construções, Agricultura, Pastagem e Solo exposto, além dos Reflorestamentos de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp*.

Na área mapeada há dois povoados, localizados respectivamente, nos vales dos arroios do Padre e Três Pinheiros. As sedes de propriedades rurais localizam-se principalmente nos vales e sobre o planalto. No mapeamento realizado identificaram-se 309 construções, constituídas por casas, galpões, igrejas e escolas.

A agricultura de subsistência e a pecuária em pequenas propriedades são as principais atividades econômicas da região. As plantações ocupam pequenas áreas de no máximo 14 ha. Predominam cultivos de milho, cítricos, uva, cana-de-açúcar, mandioca, banana, erva-mate e

hortigranjeiros. As áreas plantadas localizam-se nos vales até a meia encosta, em locais de menor declividade. As pastagens, freqüentemente associadas a atividades agrícolas, constituem pequenas seções nos fundos dos vales, próximas às construções.

No Pró-Mata existem duas plantações de *Pinus spp* que ocupam uma área total de 22,7 ha. A plantação localizada ao sul da estrada principal em direção à sede é antiga, sendo que as árvores possuem entre 30 e 35 m de altura, há muitos troncos caídos e o solo está coberto por uma grande quantidade de xaxins. Próximo à portaria do Pró-Mata, já fora do seu limite, há uma grande plantação de *Pinus sp* que cobre uma área de 85,92 ha.

### 25.10 Conclusões

As imagens com alta resolução QuickBird demonstraram ser adequadas para mapear em detalhe o uso/cobertura da terra na área de estudo. A exatidão cartográfica obtida na correção geométrica das imagens foi satisfatória para os objetivos deste estudo.

Os testes com a classificação digital da imagem QuickBird por meio do aplicativo eCognition 2.1 não apresentaram os resultados esperados. No eCognition, os parâmetros de entrada para a segmentação são empíricos e abstratos, sendo extremamente relacionados com os objetivos do trabalho e com a imagem utilizada. A segmentação *multirresolução* realizada no eCognition apresentou um excelente desempenho, entretanto ocorreu certa dificuldade para classificar a imagem. O classificador da função *fuzzy* de pertinência apresentou piores resultados, quando comparado ao classificador vizinho-mais-próximo, pois no primeiro, não são adquiridas amostras para classificar a imagem. De acordo com informações obtidas da empresa Definiens, na versão 3.0 do aplicativo, este problema já foi resolvido.

Para mapear a área, foi utilizada a interpretação visual da imagem, verificando-se que apesar da subjetividade desse procedimento metodológico, ela ainda é a melhor opção para o mapeamento desta área, sendo o mapa obtido de excelente qualidade.

Neste estudo verificou-se que diversas áreas do Pró-Mata, embora protegidas por lei, estão constantemente sujeitas a processos de destruição. Desta forma, o mapeamento realizado permitirá melhorar o gerenciamento e ampliar os conhecimentos sobre o Pró-Mata.

### 25.11 Referências Bibliográficas

- ANTUNES, A. F. B. *Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial*. Curitiba, 147 p. Tese (Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. 2003.
- BAASKE, R. *Vegetationskartierung des Forschungsgebiets PRÓ-MATA, Rio Grande do Sul, Brasilien, unter Verwendung von CIR-Luftbildern*. Rotenburg, 129 p. (Dipl.-Arbeit) F. R. Rottenburg, 1999.
- BERTOLETTI, A. C. R. *Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza PRÓ-MATA*. Divulgação do Museu de Ciência e Tecnologia – UBEA/PUCRS, Porto Alegre, n. 2, 1995. 47 p.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. *Principles of geographical information systems*. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York: Lewis Publishers, 1999. 136 p.

- DEFINIENS IMAGING. *eCognition: User Guide*. 468 p. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com/download/ecognition>>. Acesso em: 10 mar. 2002.
- DIGITALGLOBE. *QUICKBIRD imagery products – products guide*. 54 p. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com>>. Acesso em: 9 abr. 2003.
- FORD, G. E.; ZANELLI, C. I. Analysis and quantification of errors in the geometric correction of satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 51, n. 11, p. 1725-1734, nov. 1985.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER (FEPAM). *Mata Atlântica no Rio Grande do Sul. Tombamento da Reserva da Biosfera*. Mapa. 1: 250 000. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/programas/kfw.asp>>. Acesso em: 13 fev. 2002.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica. Período de 1995-2000*. São Paulo. 46 p. 2002.
- GERLACH, F. *Understanding rational polynomial coefficients and image geometric models*. Disponível em: <<http://www.imagingnotes.com>>. Acesso em: 25 jan. 2002.
- GONÇALVES, L.; FONSECA, A. M.; CAETANO, M. Exploração de imagens de alta resolução do satélite Ikonos. In: *Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (Esig 2001)*, 6., Lisboa, 2001. Série Comunicação. 22 p.
- HOFFMANN, A. *Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr hochauflösenden Daten: Methoden der Segmentierung, der hierarchischen Klassifizierung und der per-parcel Methode mit Daten der digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit für die Aktualisierung topographischer Karten*. München, 200 p. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Dissertation im Fach Geographie, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico do uso da Terra*. Manuais Técnicos em Geociências, n. 7, Rio de Janeiro, 1999. 58 p.
- \_\_\_\_\_. *Manual técnico da vegetação brasileira*. Manuais Técnicos em Geociências, n. 1, Rio de Janeiro, 1992. 92 p.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, pp. 159-174, 1977.
- MANTOVANI, W.; SILVA, S. M. *Considerações fitogeográficas e conservacionistas sobre a floresta Atlântica no Brasil*. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br/ma/index.html>>. Acesso em: 27 jan. 2002.
- MARCUZZO, S.; PAGEL, S. M.; CHIAPPETTI, M. I. S. *A reserva da biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul: situação atual, ações e perspectivas*. Porto Alegre: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 1998. Caderno n. 11. 60 p.
- MCCARTHY, F.; CHENG, P.; TOUTIN, Th. *Case study of using Ikonos imagery in small municipalities*. Disponível em: <<http://www.comonline.com/Common/currentissues/Nov01/cheng.html>>. Acesso em: maio 2002.
- PETRIE, G. *Optical imagery from airborne & spaceborne platforms, comparisons of resolution, coverage & geometry for a given ground pixel size*. Disponível em: <<http://www.geoinformatic.com>> Acesso em: 2 jul. 2002.

- PINHEIRO, E. S. *Avaliação de imagens QuickBird na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE-10094-TD/891, 2003. 173 p. Disponível em: <iris.sid.inpe.br:1913>.
- RIZZINI, C. T. *Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos*. 2 ed. São Paulo: Hucitec; Edusp, 1997. 747 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. 2. ed. New York: Academic Press, 1997. 522 p.
- SCHWARZ, M; STEINMEIER, C.; WASER, L. *Detection of storm losses in alpine forest areas by different methodic approaches using high-resolution satellite data*. Disponível em: <<http://www.dcfniens-imaging.com/down/ecognition>>. Acesso em: 6 jan. 2002.
- TAO, V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 67, n. 12 pp. 1347-1357, dec. 2001.
- TOUTIN, Th.; CHENG, P. QUICKBIRD – a milestone for high resolution mapping. *Earth Observation Magazine*, v. 11, n. 4, pp. 14-18, 2002.
- \_\_\_\_\_. Demystification of Ikonos. *Earth Observation Magazine*, v. 9, n. 7, pp. 17-21, July 2000.



## Detecção de Arruamentos em Áreas de Ocupação Urbana Irregular com Imagens do Satélite Ikonos-2

Rodrigo A. A. Nóbrega, José A. Quintanilha e Charles G. O'Hara

### 26.1 Sensoriamento Remoto como Instrumento de Auxílio ao Monitoramento do Espaço Urbano

O ambiente urbano é alvo de constantes alterações que refletem diretamente os fatores socioeconômicos resultantes num determinado período de tempo. Nas últimas quatro décadas, o intenso processo de urbanização ocorrido no Brasil, em especial nas grandes cidades, tem gerado diversos problemas relacionados ao uso do solo. Se por um lado analisar e entender essas mudanças são processos fundamentais para um bom planejamento e gestão das cidades, por outro, o crescimento desenfreado dos centros urbanos tem-se mostrado um grande obstáculo. Tradicionalmente, as Secretarias Municipais de Planejamento, assim como outros órgãos governamentais afins, são responsáveis pela manutenção da base de dados urbana atualizada, o que inclui a base cartográfica.

Monitorar e mapear as transformações do espaço urbano, por meio de técnicas tradicionais, são tarefas onerosas que não permitem um acompanhamento efetivo das mudanças diárias que ocorrem nas grandes cidades. Todavia, as novas tecnologias de sensoriamento remoto orbital permitem o acesso a dados com maiores resoluções espaciais. Feições urbanas, antes invisíveis nas tradicionais imagens de média resolução, podem ser facilmente visualizadas nas imagens de alta resolução, incluindo o sistema viário. Da mesma forma, aumentou-se a sensibilidade radiométrica dos novos sensores, o que permite assegurar a gravação de dados, mesmo em áreas de alto contraste, comuns no ambiente urbano. Por outro lado, esse desenvolvimento tecnológico tem demandado o desenvolvimento de novas técnicas de classificação das imagens digitais geradas.

À primeira vista, porém, nem tudo pode ser considerado simples e inovador. Segundo Quintanilha e Silva (2005), ao mesmo tempo em que as imagens de alta resolução espacial passaram a oferecer novas oportunidades em termos de geoinformação, o significativo aumento da quantidade de informação dessas novas cenas tornou-se um desafio para os algoritmos de classificação *pixel-a-pixel*, tradicionalmente utilizados em imagens de satélite. A alta variabilidade dos padrões espectrais dos objetos urbanos detectados nessas imagens compromete significativamente a eficiência de classificadores paramétricos. Sendo a cidade um ambiente artificial e criado pelo homem, pode-se complementar a identificação dos objetos urbanos introduzindo-se regras auxiliares no processo de classificação de imagens. Com isso, a alternativa que tem mostrado melhores resultados na classificação de imagens de alta resolução tem sido aquela orientada a objetos, na qual objetos primitivos são extraídos a partir da segmentação de imagens com alta resolução espacial.

Esse novo paradigma para a classificação de imagens de satélite oferece a oportunidade de desenvolverem-se novos métodos de identificação do uso e ocupação do solo urbano, em particular na discriminação e mapeamento de ocupações irregulares ou informais, as quais se desenvolvem em velocidades superiores à frequência de atualização da base cartográfica. Seguindo essa linha, é apresentada, neste texto, uma estratégia para a detecção e classificação de vias em áreas ocupadas por favelas e áreas de ocupação não planejada do solo urbano. Para o desenvolvimento da metodologia, imagens multispectrais do satélite Ikonos-2 foram segmentadas, e os segmentos foram utilizados como base para as regras de classificação orientada por objetos. Devido à particular forma de ocupação característica dessas periferias urbanas (padrões irregulares de pavimentação, diferentes comprimentos e larguras das vias, descontinuidade e muita heterogeneidade na ocupação do entorno das vias), foram criadas regras particulares e, embora as vias sejam mais facilmente identificadas nas imagens de sensores de alta resolução espacial, a detecção automática ainda é uma tarefa difícil. Apesar disso, os resultados obtidos indicam um enorme potencial desta ferramenta para prover informações sobre o crescimento urbano não planejado.

## 26.2 A Área de Estudo e os Recursos Empregados

O trabalho foi desenvolvido numa seção ao norte da cidade de São Paulo, ao longo de uma região caracterizada por uma ocupação urbana recente e desorganizada, incrustada numa área preservada de vegetação natural. Ao contrário do que ocorre nos países desenvolvidos, o contínuo processo de expansão da mancha urbana aqui é caracterizado pela periferização da população de baixa renda, muitas vezes não seguindo nenhum planejamento. A área-teste selecionada é um típico exemplo da periferia urbana de São Paulo, caracterizando bem a necessidade de soluções e intervenções efetivas. A remoção da floresta tropical densa e aberta, situada em terreno acidentado para a ocupação humana, tem gerado problemas ambientais que tendem a se agravar, em especial por se tratar de uma área de proteção de mananciais de água, conforme ilustrado na Fig. 26.1.



Fig. 26.1 Vista parcial da área-teste localizada na periferia norte da cidade de São Paulo

A metodologia apresentada usou como base uma imagem multispectral de 2002 do satélite Ikonos-2. A imagem em questão é um produto *Carterra Ortho Precision*, fornecida pela *Space Imaging Corporate* com bandas no azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (B, G, R e IR, respectivamente) com resolução espacial de 1 metro e resolução radiométrica de 11 bits. A imagem foi obtida a partir de um modelo digital de terreno preciso, extraído de cartas em escala 1:10.000 da Emplasa (Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A.). Para os processamentos e análises de imagem realizados neste trabalho, foram usados os pacotes de software *Erdas Imagine*, *Definiens eCognition* e *Esri ArcGIS*.

### 26.3 Metodologia

Para a detecção dos arruamentos foram necessárias várias etapas prévias (Fig. 26.2), com a finalidade de evitar misturas na classificação das ruas e minimizar a classificação errônea. Inicialmente, foi realizado o processamento das componentes principais e criados os segmentos (objetos). Na sequência, a eliminação de outras classes de cobertura de solo; por exemplo, vegetação e sombra deram suporte à detecção das áreas de solo exposto, nas quais se concentra grande parte dos arruamentos não pavimentados. Por outro lado, para auxiliar a detecção dos arruamentos pavimentados, detectaram-se inicialmente as áreas impermeabilizadas.

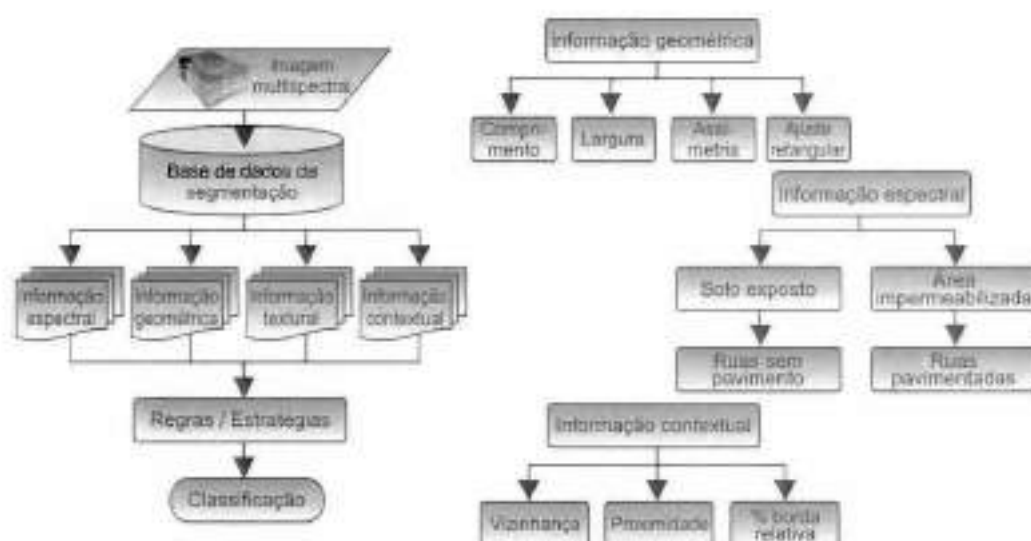


Fig. 26.2 Esquema geral da classificação orientada a objetos e informações utilizadas nas regras

#### 26.3.1 Preparação dos dados

Tratando-se de classificação de imagens por orientação a objetos, estes são normalmente extraídos das próprias imagens e dependem de outras informações obtidas por meio das imagens e diretamente de medidas realizadas nesses objetos, como forma, vizinhança ou área. Quanto mais

representativas forem as informações desses objetos, mais correta será a classificação. Os objetos foram obtidos por meio da segmentação de imagem desenvolvida no programa eCognition. Posteriormente, parâmetros adicionais foram extraídos desses objetos, tomando como referência as bandas espectrais originais; novas camadas de informações foram providas pelas componentes principais, obtidas pelo programa Imagine.

### Segmentação das imagens

As técnicas de segmentação permitem a obtenção de grupos de *pixels* (segmentos) espacialmente próximos e que possuam características espectrais e radiométricas parecidas. É um processo comumente utilizado na classificação de imagens, no intuito de se classificar, posteriormente, os segmentos em categorias.

Embora o eCognition permita o desenvolvimento da classificação em diferentes níveis de segmentação, nesta aplicação somente um nível foi empregado. Não houve aqui relacionamento contextual entre segmentos em diferentes graus de hierarquia. Utilizou-se, nessa segmentação, as quatro bandas da imagem Ikonos, aplicando-se o mesmo critério de peso a todas elas. Diferentes parâmetros como escala, critério de peso para as bandas espectrais, e critérios de forma e grau de compactação dos segmentos foram intensivamente testados até que se atingisse uma configuração em que os segmentos pudessem ser eleitos como representantes de ruas e demais feições urbanas de interesse na metodologia, como descrito em Freuman e Wolf (2005).

A segmentação sobre composições coloridas foi fortemente dificultada pela alta variabilidade (heterogeneidade) da resposta espectral das ruas e telhados. As estratégias utilizadas para a detecção de ruas dependeram também das características geométricas dos objetos ao seu redor. Priorizou-se então o critério de forma e suavização desses objetos, conforme proposto por Pinho et al. (2005). O melhor resultado obtido na segmentação ocorreu na combinação de 30 para a escala, 0.9 para a forma e 0.1 para a compactação.

### Componentes principais

A alta correlação entre as bandas espectrais originais nas imagens multiespectrais de sensoriamento remoto, decorrente da redundância de informações nelas presentes, usualmente demanda maior esforço computacional e resultados ineficientes nos processos de classificação. O uso da técnica de componentes principais tem o objetivo de atenuar os efeitos dessa correlação, transformando as combinações lineares existentes nas bandas originais em novas bandas (denominadas componentes principais), que são combinações linearmente independentes a partir das bandas originais, que retêm a maior parte da informação contida nas bandas originais em um número menor de componentes principais. Esse procedimento garante a separabilidade espectral dos objetos presentes na cena e é uma outra maneira de se prospectar informação sobre objetos urbanos em imagens de sensoriamento remoto.

A partir das quatro bandas originais, foram selecionadas as três primeiras componentes principais (PC1, PC2 e PC3). O uso combinado dessas componentes e das demais bandas espectrais da imagem permitiu a melhor discriminação tanto das áreas com solo exposto quanto das superfícies impermeabilizadas, ambas utilizadas nesta metodologia.

### 26.3.2 Mapeamento das áreas impermeabilizadas e de solo exposto

#### Criação da máscara sobre as áreas impermeabilizadas

As áreas impermeáveis foram detectadas com o objetivo de auxiliar na discriminação entre ruas pavimentadas e não-pavimentadas. Para isso foi utilizada a segunda componente principal – PC2 (Fig. 26.3) e os objetos provenientes da segmentação, detalhado em Nóbrega et al. (2006).

Os valores médios que caracterizaram os objetos identificados na segmentação foram obtidos a partir dos níveis de cinza-médios dos objetos da PC2, de tal modo que quanto maior o valor médio nessa componente, mais brilhante (ou claro) é o objeto. Neste procedimento, grande parte das áreas urbanas com coberturas de solo impermeáveis foi detectada, até mesmo as vias pavimentadas.

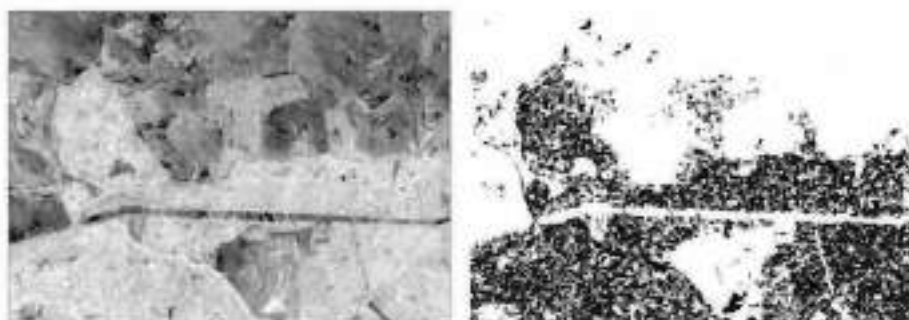


Fig. 26.3 PC2 usada na identificação de áreas com superfícies impermeabilizadas (Nóbrega et al., 2006)

#### Criação da máscara sobre áreas de solo exposto

A existência de vias não-pavimentadas ou com excessiva presença de terra sobre o pavimento ocorre com alta frequência na região de estudo. Desconsiderar tais fatores poderia acarretar resultados errôneos. Assim, a combinação de um novo nível de informação (solo exposto) apoiando a classificação, aumentou a precisão desse processo. Para a detecção dessas áreas, três classes de objetos foram definidas em sequência: vegetação, sombra e solo exposto, descritas detalhadamente em Nóbrega et al. (2006). O método tem como base o emprego de planos de informação para vegetação, sombra e solo exposto, aplicados nessa mesma sequência, sendo os dois primeiros necessários devido à complexidade da cena. A identificação e o tratamento em separado da sombra e da vegetação aumentaram a capacidade de se detectar solo exposto.

A identificação das áreas vegetadas recorreu ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que calcula a diferença normalizada dos valores de cinza entre as bandas do infravermelho próximo e vermelho (Eq.

26.1). Quanto maior a presença de vegetação, maior o valor de brilho na imagem NDVI resultante (Fig. 26.4, à esquerda).

$$\text{Indicador de vegetação} = \text{NDVI} = \left( \frac{\mu_{NIR} - \mu_{Red}}{\mu_{NIR} + \mu_{Red}} \right) \quad (26.1)$$

onde:  $\mu_{NIR}$  = nível de cinza-médio dos objetos na banda correspondente ao infravermelho próximo; e

$\mu_{Red}$  = nível de cinza-médio dos objetos na banda correspondente ao vermelho.

De forma análoga, o passo seguinte foi a identificação das áreas de sombra. Criou-se então uma categoria que incluiu sombras e outras áreas extremamente escuras presentes na imagem. Foi obtido um índice de sombra baseado na diferença entre os valores de cinza dos objetos na banda azul e na primeira componente principal. Analisadas de forma independente, as duas bandas apresentam pequenas diferenças em níveis de cinza entre os objetos de sombra em relação aos demais. No entanto, combinando-se os índices (como sugere a Eq. 26.2), obtém-se uma imagem com maior contraste entre os objetos de sombra e os demais (Fig. 26.4, centro). Vale ressaltar que os procedimentos tomam por base operações sobre imagens de 11 bits. Os limiares de corte adotados são apresentados na Tab. 26.1. Assim como as áreas vegetadas, aquelas de sombra foram detectadas e extraídas para melhorar a detecção das áreas de solo exposto, a ser executada sem maior comprometimento.

$$\text{Indicador de sombra} = \mu_{Blue} - \mu_{PC1} \quad (26.2)$$

onde:  $\mu_{Blue}$  = nível de cinza-médio por objeto na banda correspondente ao azul; e

$\mu_{PC1}$  = nível de cinza-médio por objeto na primeira componente principal.



Fig. 26.4 Esquema de detecção e exclusão sequencial de planos de informação adotado para classificar as áreas com solo exposto: áreas vegetadas, áreas de sombra e solo exposto (Nóbrega et al., 2006).


Uma vez eliminadas as áreas de vegetação e de sombra, partiu-se para a detecção das áreas de solo exposto, para a qual foi utilizado um índice proposto em Nóbrega et al. (2006). A combinação da terceira componente principal com a banda azul, como mostra a Eq. 26.3, forneceu a melhor referência para detectar essas áreas. Apesar da PC3 por si só permitir a identificação desses objetos, a excessiva heterogeneidade da área dificultou a discriminação desses objetos de edificações e ruas. A inclusão da banda azul permitiu uma melhora na separabilidade desses

objetos devido à baixa refletância e variância dos solos nus nessa banda, quando comparada às demais bandas espectrais. A constante negativa introduzida no denominador torna os valores deste índice comparável aos demais indicadores.

$$\text{Indicador de solo exposto} = (\mu_{PC3} * \mu_{Blue}) / (-100.000) \quad (26.3)$$

onde:  $\mu_{PC3}$  = nível de cinza-médio na terceira componente principal.

**Tab. 26.1** Classes, funções de pertinência e os respectivos limiares empregados no processo

Classe	Função de Pertinência		Limiares
Vegetação	NDVI		0.16 / 0.30
Sombra	Indicador de sombra		300 / 400
	Não-vegetação		
Solo exposto	Indicador de solo exposto		0.8 / 1
	Não-sombra		
	Não-vegetação		
Solo impermeabilizado	PC2		-350 / -320
	Não solo exposto		
	Não-vegetação		
	Área		
Objetos urbanos não desejados na classificação (filtragem)	Assimetria		0 / 0.5
	% borda p/ solo impem.		1 / 2
	Similaridade o/ solo impem.		
	OU		
	Brilho		1700 / 1800
	Ajuste retangular		0.5 / 1
	Classe filha de solo imp.		
	OU		
	Brilho		1700 / 1800
	Ajuste retangular		0.5 / 1
Classe filha de solo expos.			
Caminho	Indicador solo exposto		0.4 / 0.6
	NDVI		0.1 / 0.11
	Ajuste retangular		0 / 1
	% borda para vegetação		0.5 / 1
Via não pavimentada	Comprimento da borda		140 / 150
	Comprimento		25 / 50
	Comprimento / largura		0.8 / 1
	Não via pavimentada		
	Similidade solo expos.		
Via pavimentada	Não-edificação grande porte		
	Comprimento da borda		140 / 150
	Comprimento		25 / 50
	Comprimento / largura		1 / 2
	Similidade solo impem.		
	Não-objeto urbano indesejado		

### 26.3.3 Detecção das vias

Informações de forma e contexto extraídas dos segmentos auxiliaram na detecção de objetos lineares, candidatos a serem classificados como vias. Os planos de informação Solo Exposto e Áreas Impermeabilizadas apoiaram o processo de classificação. Para a detecção dos elementos lineares, a estratégia adotada concorda com aquela descrita por Skackelford e Davis (2003) e Ehlers et al. (2006), que emprega uma função de parâmetros tais como assimetria, comprimento, largura, ajuste retangular e relações entre si para detectar as vias, ilustrados na Fig. 26.5.

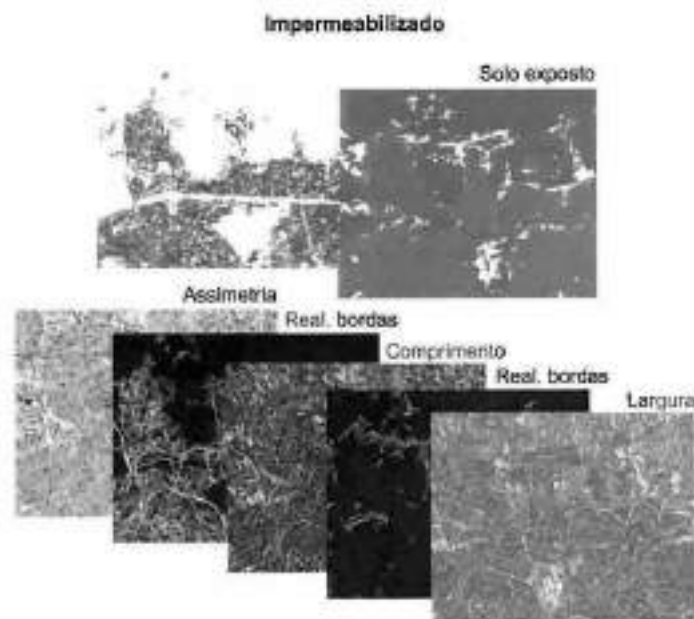


Fig. 26.5 Planos de informação usados na detecção e classificação das vias

Verificando-se as características geométricas das entidades do mundo real escolhidas, especialmente aquelas das áreas urbanas, algumas considerações devem ser feitas para tentar melhorar o resultado da extração de vias: o comprimento do objeto na imagem e a assimetria de cada um são definidos pela diferença dos dois semi-eixos. Para tanto, parâmetros como comprimento e largura são computados, utilizando-se o menor retângulo envolvente a cada objeto; sua soma define a área e o tamanho das bordas. A combinação dessas primitivas gera novas informações que podem ser utilizadas na classificação. Adicionalmente, parâmetros geométricos podem ser obtidos a partir da esqueletização ou afinamento dos objetos, tornando-os, de fato, elementos lineares. A conectividade entre elementos lineares pode ser um bom parâmetro para a avaliação da malha viária detectada. Os conceitos de morfologia matemática sobre os quais se baseiam os procedimentos do software eCognition podem ser vistos em Serra (1983), e uma descrição do pacote de software utilizado encontra-se em Definiens (2004).

De fato, a forma é uma propriedade que ajudou na busca e diferenciação entre vias não-pavimentadas e áreas com solo exposto e entre vias pavimentadas e áreas impermeabilizadas.



Também serviu para identificar feições urbanas como grandes edificações e estacionamentos confundidos com ruas. Este problema foi minimizado mediante as regras de filtragem baseadas nas propriedades geométricas. A Tab. 26.1 mostra os objetos primitivos básicos e as condições impostas nas regras de classificação.

A análise visual do mapa da rede viária gerado constatou a presença excessiva de objetos indesejados, principalmente edificações, classificados como vias. Esse problema foi amenizado por meio de filtros iterativos baseadas nas informações de geometria e contexto. Objetos desconectados, previamente classificados como ruas, foram descartados pelos critérios de borda relativa e área mínima. Entretanto, várias ruas também foram removidas, e surgiram também quebras nas ruas já identificadas, aumentando o erro de omissão no processo de detecção do sistema viário. Como resultado, algumas ruas não foram classificadas, gerando vazios no mapa final devido à grande diversidade espectral e textural constatada nos *pixels* bem como a alta variabilidade dos padrões de formas.

#### 26.4 Resultados

A exatidão dos resultados da classificação foi obtida comparando-os a um mapa de referência das ruas. Efetuou-se uma análise quantitativa entre as áreas comuns, feições erroneamente classificadas e feições não classificadas. Devido ao limitado acesso à área, não foram realizadas visitas ao local, que permitissem a coleta de amostras reais. Todavia, considerando ruas como feições visíveis e passíveis de serem mapeadas e que o monitoramento do crescimento da mancha urbana é feito tradicionalmente por meio de análises visuais de imagens de satélites e fotografias aéreas, o mapa de referência foi obtido vetorizando-se os polígonos de referência sobre as imagens, como mostra a Fig. 26.6 (esquerda). Levando em consideração as limitações da adoção de dados Ikonos para a extração de mapas de referências, bem como os procedimentos de generalização cartográfica utilizados na classificação, essa digitalização da rede viária foi obtida a partir de uma combinação das bandas azul, verde e vermelho na escala 1:2.000, visando minimizar eventuais erros de interpretação. Os polígonos resultantes da digitalização foram considerados livres de erros.

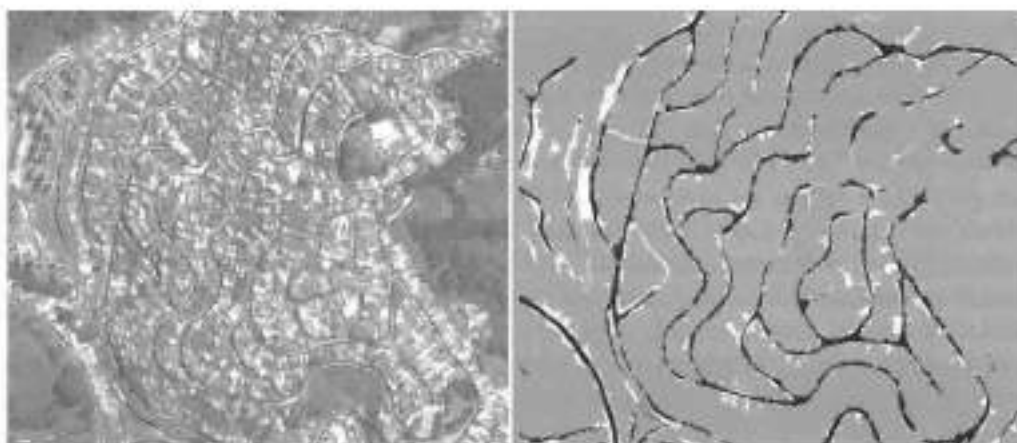


Fig. 26.6 Polígonos de referência sobrepostos a imagem Ikonos e o resultado da análise de exatidão

Para gerar os planos de informação necessários à análise (classificação correta, vias não detectadas e vias detectadas erroneamente), tanto o mapa de referência quanto o mapa final da classificação foram introduzidos num programa de SIG. A intersecção entre as áreas resultantes da classificação com o mapa de referência das vias revela quais foram classificadas corretamente. Para a detecção das áreas não-classificadas, subtraíram-se do mapa de referência das vias as áreas classificadas, o que revelou espacialmente as áreas afetadas pelo erro de omissão. Por sua vez, a classificação errônea (ou erro de comissão) foi estimada subtraindo-se das áreas classificadas o mapa de referência das vias. A Fig. 26.6 (direita) ilustra as vias corretamente classificadas em preto, as incorretamente classificadas em branco e as não-classificadas em cinza-médio.

## 26.5 Discussão, Conclusões e Trabalhos Futuros

De modo geral, considerando-se os problemas citados, especialmente o alto grau de diversidade e heterogeneidade da área e os objetivos propostos, os resultados foram satisfatórios. O maior desafio ainda é a ausência de padrões espectrais, texturais e geométricos para descrever objetos urbanos.

A exatidão da classificação obtida foi de 65%, o que difere de outros resultados publicados com o emprego da classificação por objetos, nos quais esse índice é maior. Todavia, vale ressaltar que, neste caso, os objetos de interesse são ruas localizadas em regiões de ocupação irregular, as quais apresentam larguras irregulares, os tipos de material dos pavimentos não são uniformes nem têm o mesmo tempo de uso, gerando texturas complexas. A alta complexidade dos objetos de interesse presentes nessa área dificulta até mesmo a discriminação visual. Os erros de omissão (vias que não foram classificadas) e de comissão (objetos de outras classes classificados aqui como vias) foram de 35% e 72%, respectivamente. Análises posteriores revelaram que a maioria dos objetos não-classificados foram ruas sujas, trechos oclusos por árvores e/ou veículos. Edificações e outros elementos da cena, construídos pelo homem, também foram confundidos com ruas.

Analisando-se visualmente a imagem resultante percebe-se, sem maiores esforços, a malha viária, conforme ilustra a Fig. 26.7. Todavia, em números, os erros de omissão e comissão são grandes. Uma explicação é que a largura de muitas das vias é pequena, em alguns casos não atingindo quatro ou cinco metros e, embora a resolução espacial da imagem utilizada seja de um metro, qualquer *pixel* classificado erroneamente acaba pesando significativamente, uma

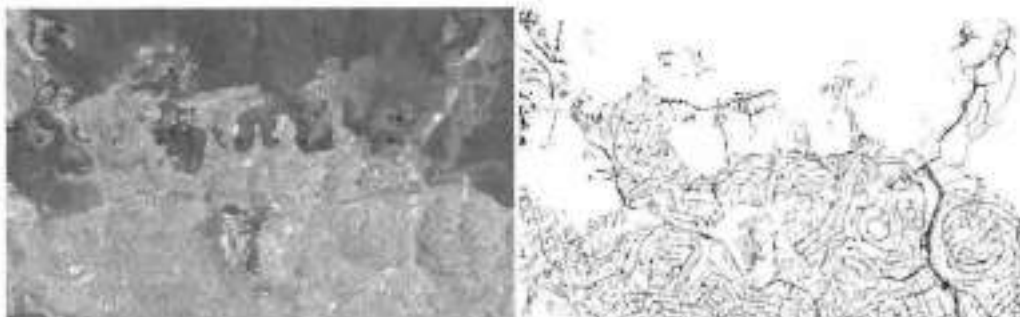


Fig. 26.7 Imagem Ikonos usada como referência, e o mapa final de ruas obtido

vez que as vias passam a ser compostas de poucos *pixels* conectados. Nesta analogia, numa via estreita, bastam dois *pixels* detectados erroneamente em cada uma das calçadas para que o erro de comissão seja superior a 50%. No entanto, uma observação importante é que se os resultados forem generalizados para uma escala de 1:5.000, comumente utilizada para planejamento e monitoramento urbano, uma boa parte desse ruído é eliminado, aspecto este que será tratado em trabalhos futuros.

Para completar as análises dos resultados, pretendemos fazer uso de regras para validação da malha viária detectada, baseada em parâmetros como completude, correção, qualidade, estatísticas de redundância e de discontinuidades dos vetores das ruas, conforme proposto por Seo e O'Hara (2004).

## 26.6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao GeoResources Institute of Mississippi State University, ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ao CNPq e à Capes.

## 26.7 Referências Bibliográficas

- BARROS, M. T. L. *Gerenciamento integrado de bacias hidrográficas em áreas urbanas*. CNPq-EPUSP, São Paulo, 2004.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GIS-Zeitschrift für Geo-information-systeme*, Heft 6, pp. 12-17, 2001.
- DEFINIENS IMAGING GMBH. *eCognition's User Guide*. Munich, 480 p., 2004.
- EHLERS, M.; MICHEL, U.; BOHMANN, G.; TOMOWSK, D. Decision based data fusion techniques for the analysis of settlement areas from multisensor satellite data. *Proceedings of the ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, 2006.
- FREAUMAN, E.; WOLF, E. Segmentation of very high spatial resolution satellite images in urban areas for segment-based classification. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas*, Tempe, Arizona, 2005.
- HOFMANN, P. Detecting informal settlements from Ikonos image data using methods of object oriented image analysis – an example from Cape Town (South Africa). In: JÜRGENS, C. (Ed.) *Remote sensing of urban areas / Fernerkundung in urbanen räumen*. *Regensburger Geographische Schriften*, Heft 35, Regensburg, pp. 41-42, 2001.
- NOBREGA, R. A. A.; O'HARA, C. G.; OLSON, G.; KIM, S.; VIJAYARAJ, V.; QUINTANILHA, J. A.; BARROS, M. T. L. Extracting and classifying bare soil erosion risk areas in an urban basin using object-oriented technologies, high resolution imagery and elevation data. *Proceedings Geographic Information Systems and Water Resources IV - AWRA Spring Specialty Conference*, Houston, 2006.
- PINHO, C. M. D.; FEITOSA, F. F.; KUX, H. J. H. Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagens Ikonos: comparação entre a abordagem *pixel-a-pixel* e orientada a objetos. In: *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, INPE, pp. 4217-4224, 2005.

- QUINTANILHA, J. A.; SILVA, O. F. Identification of urban objects through Ikonos images. In: *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia, INPE, pp. 4265-4268, 2005.
- REPAKA, S.; TRUAX, D.; KOLSTAD, E.; O'HARA, C. G. Comparing spectral and object-based approaches for classification and transportation feature extraction from high resolution multispectral imagery. *Proceedings of the ASPRS 2004 Annual Conference*, 2004.
- SEO, S.; O'HARA, C. G. Quantifying linear feature extraction performance. *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Denver, 2004.
- SERRA, J. *Image analysis and mathematical morphology*. London: Academic Press, 1983.
- SKACKELFORD, A. K.; DAVIS, C. H. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v. 41, n. 10, pp. 2354-2363, 2003.
- TSO, B.; MATHER, P. M. *Classification methods for remotely sensed data*. London: Taylor and Francis, 2001.

## Índice dos Autores

- ALMEIDA, Cláudia Maria**  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos - SP - Brasil  
E-mail: almeida@dsr.inpe.br
- AMMER, Ulrich**  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und  
Naturschutz  
E-mail: ulrich.ammer@lrz.tu-muenchen.de
- ANDRESEN, Thorsten**  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Limnologische Station Iffeldorf der TU München  
E-mail: andresen@limno.biologie.tu-muenchen.de
- ANTUNES, Alzir Felipe Buffara**  
UFPR, Setor de Ciências da Terra, Curso  
de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,  
Curitiba - PR - Brasil  
E-mail: felipe@ufpr.br
- ARAÚJO, Eduardo H. G.**  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos - SP - Brasil  
E-mail: araujo@dsr.inpe.br
- BAATZ, Martin**  
Definiens AG, München  
E-mail: mbaatz@definiens.com
- BALTSAVIAS, Emmanuel**  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,  
ETH-Hoenggerberg, Zürich  
E-mail: emmanuel.baltsavias@geod.baug.ethz.ch
- BARUTH, Bettina**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz
- BLASCHKE, Thomas**  
Fachbereich Geographie, Universität Salzburg  
E-mail: thomas.blaschke@sbg.ac.at
- BORG, Erik**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz  
E-mail: erik.borg@dlr.de
- BROCKMANN, Carsten**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz
- BUCK, Alfred**  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und  
Naturschutz  
E-mail: alfred.buck@lrz.tu-muenchen.de
- CAZES, Thiago B.**  
Depto. Engenharia Elétrica, Pontifícia  
Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)  
E-mail: tcazes@ele.puc-rio.br
- CENTENO, Jorge Antonio Silva**  
UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas, Curitiba - PR - Brasil  
E-mail: centeno@ufpr.br
- COSTA, Gilson A. O. P.**  
Depto. Engenharia Elétrica, Pontifícia  
Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)  
E-mail: gilson@ele.puc-rio.br
- DAMEROV, Heiko**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz
- EHLERS, Manfred**  
Hochschule Vechta, Institut für  
Umweltwissenschaften,  
Abteilung Geoinformatik  
E-mail: mehlers@iuv.uni-vechta.de

**EISL, Markus**

Geospace Satellitenbilddaten GmbH  
Salzburg

**FEIJÓ, Bruno**

Depto. Informática, Pontifícia Universidade  
Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)  
E-mail: bruno@inf.puc-rio.br

**FEITOSA, Raul Q.**

Depto. Engenharia Elétrica, Pontifícia  
Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)  
E-mail: raul@ele.puc-rio.br

**FLORENZANO, Teresa G.**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos - SP - Brasil  
E-mail: teresa@dsr.inpe.br

**FICHTELMANN, Bernd**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz  
E-mail: fichte@nz.dlr.de

**FISCHER, Jürgen**

Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geographie  
Abt. Kartographie und Geofernerkundung

**FRAUENDORF, Judith**

Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geographie  
Abt. Kartographie und Geofernerkundung  
E-mail: frauendorf@geographie.uni-halle.de

**GÄHLER, Monika**

Hochschule Vechta, Institut für  
Umweltwissenschaften,  
Abteilung Geoinformatik  
E-mail: mgaezler@iurw.uni-vechta.de

**GLÄSSER, Cornelia**

Universität Halle-Wittenberg, Institut für  
Geographie  
Abt. Kartographie und Geofernerkundung  
E-mail: glaesser@geographie.uni-halle.de

**GUDER, Hans-Georg**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz

**GÜNTHER, Adolf**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz

**JANOTH, Jürgen**

Geospace Satellitenbilddaten GmbH  
Salzburg  
E-mail: juergen@geospace.co.at

**JANOWSKY, Ronald**

Hochschule Vechta, Institut für  
Umweltwissenschaften,  
Abteilung Geoinformatik  
E-mail: rjanowsky@iurw.uni-vechta.de

**KLAUSHOFER, Franz**

Geospace Satellitenbilddaten GmbH  
Salzburg

**KOK, Roeland de**

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und  
Naturschutz  
E-mail: roeland.dekok@lrz.tu-muenchen.de

**KNÖPFLE, Walter**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Oberpfaffenhofen

**KUX, Hermann Johann Heinrich**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
- INPE  
São José dos Campos - SP - Brasil  
E-mail: hermann@dsr.inpe.br

**LANG, Stefan**

Institut für Geographie und Angewandte  
Geoinformatik  
Universität Salzburg  
E-mail: stefan.lang@sbg.ac.at

**LEHMANN, Frank**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Berlin-Adlershof

**LESER, Cornelia** (*Hornfeck*)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Oberpfaffenhofen  
E-mail: cornelia.hornfeck@dlr.de

**LEUKERT, Kristin**

Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg  
E-mail: kristin.leukert@unibw-muenchen.de

**LUCKEL, Wilfried**

Geospace Satellitenbilddaten GmbH  
Salzburg

**MEINEL, Gotthard**

Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.,  
Dresden  
E-mail: g.meinel@ioer.de

**MIMLER, Matthias**

Definiens AG, München  
E-mail: mmiml@definiens.com

**MÖLLER, Markus**

Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH,  
Sektion Angewandte Landschaftsökologie  
E-mail: moeller@alok.ufz.de

**MÖLLER, Matthias**

Hochschule Vechta, Institut für  
Umweltwissenschaften,  
Abteilung Geoinformatik  
E-mail: mmoeller@iurwuri-vechta.de

**MOTT, Claudius**

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und  
Naturschutz  
E-mail: claudius.mott@lrz.tum.de

**NEUBERT, Marco**

Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.  
Dresden  
E-mail: m.neubert@ioer.de

**NOACK, Wolfgang**

Ixl Satelliten-Informationen-Aktiengesellschaft  
(ixl-AG), Oberpfaffenhofen

**NÓBREGA, Rodrigo A. A.**

Departamento de Engenharia de Transportes,  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo  
E-mail: rodrigo.nobrega@poli.usp.br

**O'HARA, Charles G.**

GeoResources Institute, Mississippi State  
University, Starkville, MS, EUA  
E-mail: cgohara@gri.msstate.edu

**OLBERT, Carsten**

Universität Halle-Wittenberg, Institut für  
Geographie  
Abt. Kartographie und Geofotorekundung

**PILZ, Hans**

E-mail: hanspilz@gmx.at

**PINHEIRO, Eduardo S.**

UFAM - Universidade Federal do Amazonas  
Manaus - AM  
E-mail: pinheiro\_rs@yahoo.com.br

**PINHO, Carolina Moutinho Duque de**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
- INPE  
São José dos Campos - SP - Brasil  
E-mail: cmdpinho@yahoo.com.br

**QUINTANILHA, José A.**

Departamento de Engenharia de Transporte,  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
E-mail: jaquina@usp.br

**REDER, Johannes**

Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden  
E-mail: j.reder@ioer.de

**REICHEL, Lutz**

Ixl Satelliten-Informationen-Aktiengesellschaft  
(ixl-AG), Oberpfaffenhofen  
E-mail: lutz.reichel@ixl-satinfo.com

**REIMER, Roland**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
(DFD), Neustrelitz

**ROSENBERG, Matthias**  
 Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle  
 GmbH,  
 Sektion Angewandte Landschaftsökologie  
 E-mail: mrosenb@alok.ufz.de

**SCHIEWE, Jochen**  
 Hochschule Vechta, Institut für  
 Umweltwissenschaften,  
 Abteilung Geoinformatik  
 E-mail: jschiewe@iuv.uni-vechta.de

**SCHNEIDER, Thomas**  
 Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
 Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
 Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und  
 Naturschutz  
 E-mail: t.schneider@wzwtum.de

**SCHRÖDER, Uwe**  
 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat U3  
 Landschaftspflege, Vegetationskunde  
 E-mail: uwe.schroeder@bafg.de

**SCHÜPFERLING, Ralf**  
 Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
 Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
 Limnologische Station Iffeldorf der TU  
 München

**STROBL, Josef**  
 Institut für Geographic und Angewandte  
 Geoinformatik,  
 Universität Salzburg  
 E-mail: josef.strobl@sbg.ac.at

**TUFTE, Lars**  
 Hochschule Vechta, Institut für  
 Umweltwissenschaften,  
 Abteilung Geoinformatik  
 E-mail: ltufte@iuv.uni-vechta.de

**VOLK, Martin**  
 Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle  
 GmbH,  
 Sektion Angewandte Landschaftsökologie  
 E-mail: volk@alok.ufz.de

**WOLFF, Edwina**  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 (DLR)  
 Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
 (DFD), Neustrelitz

**ZHANG, Chunsun**  
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,  
 ETH-Hoenggerberg, Zürich  
 E-mail: chunsun@geod.baug.ethz.ch

**ZIMMERMANN, Stefan**  
 Wissenschaftszentrum Weihenstephan für  
 Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
 Limnologische Station Iffeldorf der TU  
 München  
 E-mail: sz@limno.biologie.tu-muenchen.de