

A INCORPORAÇÃO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS AOS ESTUDOS DE RECURSOS NATURAIS: LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Valdir Francisco Veronese*

Introdução

A informatização dos procedimentos é uma clara tendência em todas as áreas das ciências da terra. A corrida que se verifica no âmbito das empresas e instituições do setor para equipar-se com os mais modernos sistemas computacionais disponíveis no mercado para processamento de informações espaciais georreferenciadas é uma evidência concreta desta tendência (Rosa, 1995). A decisão de investir na implantação de unidades de geoprocessamento parte do princípio de que a informatização dos procedimentos tradicionalmente efetuados de forma manual resultará em rápido retorno em termos de rapidez, precisão e eficiência. Na prática, entretanto, o retorno esperado fica às vezes aquém das expectativas, com desapontamento dos gerentes e dos profissionais envolvidos. Neste artigo, procura-se analisar alguns aspectos relativos à incorporação de processos automatizados às sistemáticas de estudos de recursos naturais e meio ambiente,

focalizando a questão da extração das informações das imagens de satélite, através do processamento digital. Ao levantar esta questão busca-se examinar o custo-benefício e a viabilidade de se substituir efetivamente os métodos manuais, baseados na interpretação visual de imagens em papel fotográfico, pelos métodos digitais.

O artigo inicia com uma descrição sucinta das principais técnicas utilizadas no Processamento Digital de Imagens - PDI - no intuito de situar o leitor menos familiarizado com o assunto. A seguir, aborda-se um dos recursos do PDI, precisamente a **classificação digital**, sob a ótica de suas possibilidades e limitações. Na seqüência, apresenta-se uma comparação entre a classificação digital e a interpretação visual, e descreve-se alguns métodos de refinamento da classificação, através da incorporação de informações ancilares em Sistemas de Informações Geográficas - SIG. O artigo é finalizado com uma discussão dos rumos e perspectivas da informatização no reconhecimento de padrões de imagens para recursos naturais.

O Processamento Digital das Imagens (PDI)

Uma descrição detalhada das técnicas de PDI está além do escopo deste artigo. Todavia, julgou-se pertinente relacionar as técnicas mais rotineiras, com breve descrição da natureza dos dados e os recursos técnicos disponíveis na maioria dos *softwares* de processamento de imagens, com o propósito de fundamentar as análises e comparações que serão posteriormente apresentadas.

A natureza dos dados

Uma imagem digital é composta por uma malha regular formada por linhas e colunas cujas células são denominadas **pixels**. O pixel representa uma área da superfície da terra com uma localização específica, cujas dimensões vão depender da resolução do sensor. A cada pixel está associado um valor de intensidade da radiação eletromagnética.

*Pesquisador do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE/DIGEO.1/NE.1 Setor de Tratamento Gráfico.
R. bras. Geogr., Rio de Janeiro, v.57, n.3, p. 29-38, jul./set., 1995.

Todo o processamento digital consiste na manipulação destes valores, que são usualmente referidos como **níveis de cinza**. A natureza digital dos dados permite uma série de manipulações baseadas em regras matemáticas e estatísticas.

Manipulação das cores

A imagem é geralmente exibida através da combinação de três filtros de cores. A técnica consiste em transformar os níveis de cinza em intensidade das cores primárias (vermelho, verde e azul). Quando três bandas desta imagem forem alocadas aos filtros de cor, os distintos níveis de cinza em cada banda formarão cores resultantes da combinação de vermelho, verde e azul. Esta modalidade de *display* é denominada de **falsa cor**. As cores podem ser modificadas pela mudança na ordem de alocação das bandas aos respectivos filtros de cor.

Uma única banda de uma imagem será normalmente exibida em tons de cinza. Existem, porém, técnicas para a conversão de uma imagem monocromática em imagem colorida pela manipulação dos níveis de cinza de imagem unidimensional em três dimensões de cores. As técnicas mais conhecidas são denominadas **pseudocor** (este método associa uma cor distinta para cada nível de cinza) e **fatiamento** (subdivisão dos níveis de cinza em intervalos que são representados por cores).

Manipulação do contraste

Os sensores são desenhados para registrar valores num determinado intervalo (geralmente 0 a 255). Por exemplo, na faixa espectral do infravermelho próximo, os pixels que representam sombra, rochas máficas ou água ficarão próximos de zero, enquanto que as áreas com nuvens ou neve poderão ficar próximos de 255. Dificilmente, entretanto, todo o intervalo estará representado numa ima-

gem. O mais comum é que ela mostre uma concentração de valores em um determinado intervalo, o que resulta em baixo contraste. Em consequência, feições similares não são distinguíveis. Os realces de contraste expandem o intervalo dos níveis de cinza de forma que eles são exibidos num intervalo maior. Os realces envolvem a manipulação dos níveis de cinza de modo a melhorar o *display* e aumentar a quantidade de informação que pode ser extraída visualmente.

O tipo mais comum de realce é o **linear**. Existe, porém, uma grande variedade de técnicas de realce destinadas a ampliar o contraste, as quais levam em consideração a frequência dos níveis de cinza (*histogram equalization*) ou processam de forma distinta as diferentes populações (*piecewise stretch*). Um tipo especial de realce é o *thresholding*, uma técnica para dividir os níveis de cinza de uma imagem em uma ou duas categorias - acima e abaixo de um determinado patamar. Este é um dos vários métodos para criar uma máscara binária para a imagem.

Operações aritméticas

Estas técnicas consistem de soma, subtração, multiplicação e divisão de imagens. Estas operações são geralmente efetuadas entre bandas de uma imagem ou entre imagens tomadas em diferentes datas com vários objetivos: obtenção da média, verificação de mudanças em cenas tomadas em datas diferentes, estratificação da imagem, realce de determinados alvos, eliminação do efeito da topografia e outros efeitos multiplicativos.

Principal componente

É uma técnica estatística que rotaciona os eixos de uma imagem no espaço multi-dimensional na direção dos eixos de maior variância. Tem a função de definir a dimensionalidade dos dados e identificar os principais eixos de variação dos dados. Esta téc-

nica serve, também, para eliminar a redundância de informações e reduzir o número de bandas a serem processadas.

Transformação de HSI para RGB

Esta técnica usa os conceitos de matiz, saturação e intensidade das cores. **Hue** (H) (matiz, nuança da cor) - é o que a gente percebe como cor (exemplo: vermelho, azul, púrpura, rosa). É dado pelo comprimento de onda dominante. **Saturação** (S) - é o grau de pureza da cor - pode ser considerado como a proporção de branco misturado com a cor. A cor pura é 100% saturada. **Intensidade** (I) - é a medida do brilho da cor. Para algumas aplicações, resultados interessantes podem ser obtidos pela conversão RGB (intensidade de vermelho, verde e azul) para HSI e vice-versa.

Filtragem Espacial

Imagens com pouca variância podem ser visualizadas na forma de ondas de longo comprimento e baixa frequência. É o caso das áreas homogêneas e com variações graduais (exemplo: corpos de água, campos ou florestas relativamente extensas). A alta frequência corresponde a rápidas variações nos níveis de cinza de um pixel para outro. (Exemplo: contatos litológicos, rodovias, limites entre objetos e cenas distintas).

As operações espaciais chamadas **filtragem espacial** servem para "filtrar" determinadas frequências. A técnica para separar os componentes de alta frequência é chamada de *high-pass filter*. A imagem resultante vai conter todos os detalhes da imagem, especialmente os contatos. O filtro que separa as feições de baixa frequência das informações restantes na imagem é chamado *low-pass filter*. O *low-pass filter* tende a homogeneizar, retirando detalhes. O *high-pass filter*, ao contrário, vai permitir o isolamento e a amplificação do detalhe.

Classificação

Os diversos materiais da superfície da terra possuem um comportamento espectral próprio com respostas distintas nas diversas regiões do espectro eletromagnético (**assinatura espectral**). Assim, em Sensoriamento Remoto - SR - multi-espectral, um determinado pixel apresentará intensidade diferente nos diversos canais imageados. Um conjunto de pixels que apresentem um padrão semelhante de comportamento espectral poderá definir uma **classe espectral**.

O processo de classificação pode ser descrito como uma forma de reconhecimento de padrões associados a cada pixel em termos das características dos objetos ou materiais existentes nas áreas correspondentes da superfície da terra (Mather, 1987). A classificação, portanto, envolve a associação de cada pixel na imagem com um nome que descreve um objeto real ou uma categoria temática. Se a classificação é executada para todos os pixels de uma imagem, o resultado é um mapa temático mostrando a distribuição de categorias do tema (vegetação, solo, uso da terra, etc.) que são denominadas de **classe**. Uma imagem classificada é portanto um mapa temático digital, que, se for georeferenciado, pode ser incorporado a um SIG.

A classificação digital tem sido tradicionalmente dividida em **supervisionada e não-supervisionada**. Partindo do princípio de que cada material da superfície da terra deve ser representado por agrupamentos de pixels com comportamento espectral semelhante, as técnicas de classificação não-supervisionada são desenhadas para examinar um grande número de pixels e dividi-los em agrupamentos com base na sua proximidade estatística. Estas, técnicas visam, portanto, a definir as **classes espectrais** presentes numa imagem.

Na classificação supervisionada, os algoritmos são desenhados para enquadrar os pixels nas **classes de interesse** (os materiais ou categorias te-

máticas que o analista pretende discriminar). Para isto é necessário dispor de informações sobre a cena que sirvam para definir os parâmetros estatísticos das classes de interesse. Estas informações podem ser captadas em áreas da própria imagem e são conhecidas como **amostras de treinamento**. É importante que a amostra de treinamento seja bastante homogênea e representativa da classe de interesse. Portanto, enquanto o método supervisionado define as classes de interesse e depois examina a sua separabilidade estatística, o método não-supervisionado procura determinar as classes espectralmente separáveis para depois examinar o seu valor *informacional*.

As Limitações da Classificação Digital

A classificação é, entre as múltiplas finalidades de um sistema de processamento de imagem, a que desperta maior interesse e expectativa porque representa a automatização de uma finalidade precípua do SR: a interpretação, em termos dos objetos reais existentes na superfície da terra ou das categorias de interesse, dos dados captados pelos sensores. Entretanto, ao incluir a classificação digital aos métodos de pesquisa, o usuário deve estar consciente dos recursos e limitações das técnicas.

Na imagem classificada pelas técnicas não-supervisionadas, a relação entre as classes espectrais e as classes de interesse tem que ser estabelecida. Raramente as classes espectrais resultantes de uma classificação não-supervisionada representarão exatamente os materiais que se deseja discriminar. As principais limitações são: i) uma classe espectral poderá englobar mais de uma classe de interesse; e ii) uma classe de interesse poderá ficar desmembrada em mais de uma classe espectral.

Adotando-se o caminho inverso, ou seja, definindo-se primeiramente as classes de interesse e seus parâmetros estatísticos, para depois

tentar separá-las (classificação supervisionada), as seguintes dificuldades poderão ocorrer: i) materiais distintos que possuem resposta espectral semelhante serão dificilmente separáveis; ii) materiais e cenas espectralmente complexos resultarão em parâmetros estatísticos mal definidos (histogramas com variância muito elevada ou multimodais). Este pode ser o caso, por exemplo, ao se tentar separar áreas urbanas das áreas rurais e agrícolas que a circundam. O histograma de uma área urbana será composto pelas diferentes respostas espectrais das casas, ruas, jardins, praças, etc. com provável superposição com os histogramas de outras classes; e iii) algumas classes de interesse não têm, naturalmente, um comportamento espectral homogêneo em toda a sua extensão espacial (Novo, 1992).

Infelizmente, quando a classificação supervisionada é executada não se tem toda a assinatura espectral da classe de interesse. O que está disponível é apenas a reflectância em algumas faixas do espectro, correspondentes aos canais do respectivo sensor. Essa assinatura incompleta (obtida através das amostras de treinamento) fornece uma descrição parcial do objeto. Em geral, quanto maior o número de bandas ou canais considerados, maior a habilidade de discriminar os materiais, e classificá-los corretamente. Entretanto, a simples adição de bandas não vai necessariamente melhorar a classificação. A melhoria só vai ocorrer se as bandas adicionadas acrescentarem informação.

Outra dificuldade provém do fato que os níveis de cinza expressam a resposta espectral de unidades de áreas, correspondentes aos pixels, que podem ser compostas por mais de um material. Por exemplo, numa área de cultivo de laranjas, dependendo do espaçamento das árvores e da resolução do sensor, os níveis de cinza poderão expressar: i) a radiancia da copa das laranjeiras; ii) a radiancia do solo subjacente; ou iii) a mistura dos dois em diferentes

proporções (pixel misto). Neste caso, os parâmetros estatísticos desta classe tenderão a apresentar uma elevada variância ou até bimodalidade, com possível confusão com outras classes.

Na classificação de cultivos agrícolas observa-se respostas distintas em função do estágio de crescimento e maturação. Este efeito poderá ser acentuado pela influência da resposta espectral do solo subjacente. Ainda em áreas agrícolas, as assinaturas serão fortemente influenciadas pelo conteúdo de água do solo.

As imagens de áreas topograficamente heterogêneas sofrerão variância induzida pela posição dos materiais em relação à fonte de iluminação e ao sensor. Esta variância não-inerente aos materiais pode se constituir em outra fonte de erros de classificação. Foram pesquisadas técnicas para corrigir os erros devido à topografia, mas as correções topográficas nem sempre conseguem eliminar completamente as distorções (Civco, 1989).

Análise Visual versus Análise Digital

Não se deve pensar que sistema de processamento de imagens possua, no atual estado da arte, a capacidade de lançar mão de todos os parâmetros que um fotointérprete utiliza ao fazer uma análise visual. A interpretação visual envolve a identificação e comparação de uma série de parâmetros espaciais e espectrais que constituem os padrões das imagens: tom, cor, tamanho, textura, forma, associação, contexto, localização, posição topográfica, iluminação, etc. Na classificação digital, por outro lado, os padrões são reconhecidos principalmente por técnicas estatísticas que tentam modelar a resposta espectral dos pixels, agrupando-os em classes. Além disso, a maioria das técnicas processa os pixels isoladamente, ignorando o seu contexto. O não conhecimento dos fatores espaciais

como a forma, contexto e inter-relação entre os objetos está na origem das limitações da classificação digital.

Diante destas constatações, um gerente pragmático poderá chegar à conclusão que o investimento para implantação de um sistema computacional para PDI não se justifica em termos de custo-benefício e é preferível ater-se aos métodos tradicionais não-automatizados. Para esclarecimento desta questão, as seguintes considerações são pertinentes:

A qualidade dos resultados que podem ser obtidos em PDI vão depender fundamentalmente da habilidade e capacidade de selecionar os dados com as características adequadas aos objetivos dos projetos e aplicar as técnicas corretas. Os dados produzidos pelos satélites em operação, somado aos projetados para o futuro próximo, constituem um acervo que permite análises locais, regionais ou continentais, estudos multitemporais e estudos sinérgicos com combinação de dados de diferentes fontes e natureza. Estes dados são de um volume e diversidade tal que sua manipulação por métodos não-informatizados tornou-se impraticável. Apenas, para citar um exemplo, a simples seleção das melhores bandas do LANDSAT-5/TM para discriminar as classes de interesse de um determinado projeto envolve uma série de observações e análises que é vedada a um usuário sem acesso a um sistema de tratamento de imagens.

Os benefícios do processamento digital não se restringem à classificação, já que muitas das técnicas destinam-se a facilitar a extração das informações de forma visual. Portanto, mesmo atendo-se ao método visual, o processamento digital propicia uma gama de manipulações para extração das informações que de outra forma seriam inviáveis, principalmente: i) a possibilidade de visualização gráfica da distribuição estatística das populações; ii) a possibilidade de realçar a imagem como um todo ou populações específicas da imagem; iii) a possibilidade de

realçar os contatos entre objetos e outras feições lineares ou de homogeneizar feições com excessiva variabilidade; iv) a possibilidade de manipulação das cores, tanto para realce de populações em imagens monocromáticas quanto para composição de três bandas de uma imagem; v) o cálculo da variância e dimensionalidade dos dados, análise da correlação estatística entre os canais visando à eliminação da redundância de informações e à seleção das melhores bandas; e vi) as facilidades para a seleção de áreas específicas da imagem (janelas) para análise em separado.

O índice de acerto de uma classificação depende muito da habilitação e experiência do analista. Para obter-se bons resultados os seguintes cuidados são recomendáveis:

Inspeção das imagens

O primeiro passo deve ser o exame de cada banda em separado e comparação das respostas espectrais dos materiais nos diversos canais. Nesta fase devem ser produzidos os realces, os histogramas, e utilizadas todas as técnicas que possam adicionar informações sobre as classes de interesse. O conhecimento obtido nestas operações deverá auxiliar na seleção das classes e respectivas amostras de treinamento.

Seleção dos canais espectrais

O poder discriminatório do SR multiespectral reside nas diferenças em termos de comportamento espectral dos objetos nos diversos canais imageados. Por isso, é muito importante selecionar as bandas mais apropriadas para discriminar as classes de interesse, já que a utilização de todas as bandas poderá onerar o processo. Uma análise do poder discriminatório das bandas do LANDSAT/TM foi descrita por Townsend (1984). Existem várias técnicas para medir a se-

parabilidade das classes nos diversos canais e determinar a melhor combinação de bandas. Estas técnicas baseiam-se na separabilidade estatística entre as classes. Uma das mais utilizadas é a técnica denominada **Divergence** (Mausel, Kramber, e Lee, 1990; MatLela e Veronese, 1990).

Escolha do algoritmo de classificação

A técnica denominada **Maximum Likelihood (ML)** ou **Máxima Verossimilhança (MAXVER)** é uma das mais utilizadas. Sua vantagem em relação às outras técnicas estatísticas provém do fato de utilizar a covariância dos dados (além da distância da média) como critério de decisão. Ince (1987) apresenta uma análise comparativa da eficiência desta técnica supervisionada. Todavia, para o uso de técnicas supervisionadas, é essencial um certo nível de conhecimento da área para poder selecionar amostras de treinamento homogêneas e representativas. Uma forma de avaliar a homogeneidade das amostras de treinamento é examinar o seu histograma. Uma amostra homogênea terá um histograma geralmente unimodal. Se o histograma for multimodal, o desempenho da classificação será prejudicado. Será preferível subdividir a classe.

No caso de não se dispor de amostras de treinamento confiáveis, será preferível lançar mão de técnicas não-supervisionadas. Os métodos híbridos poderão também produzir bons resultados. Exemplo: determinação das classes espectrais através de métodos não-supervisionados e utilização das classes espectrais com maior valor *informacional* como **assinaturas espectrais** para a classificação supervisionada. Para uma descrição detalhada das técnicas de classificação, consultar Jensen (1986) e Mather (1987).

Utilização de informações ancilares

São denominadas **ancilares** ou **colaterais** as informações externas ao SR, que estão muitas vezes disponíveis em cartas e mapas. Estas informações podem ser utilizadas para melhorar a classificação desde que sejam convertidas ao formato compatível com o processamento digital. Para isso é necessário a integração do PDI com os Sistemas de Informações Geográficas - SIG.

Integração com Sistemas de Informações Geográficas

Os usuários envolvidos em estudo de recursos naturais e meio ambiente raramente utilizam informações derivadas apenas de SR. Geralmente as informações provêm de uma variedade de fontes, espaciais e não-espaciais. O SIG é um sistema de informações cujos *inputs* primários são dados espaciais georeferenciados. Um SIG completo vai incluir funções de aquisição, codificação, manipulação, armazenamento e recuperação, análise, extração e *display* dos dados. Os dados de SR incluídos num SIG podem ser visto como parte integrante do mesmo.

A integração imagem/mapa digital poderá dar-se pela transferência das imagens ao SIG ou pela importação dos mapas digitalizados para o Sistema de Processamento de Imagens. A opção por um destes caminhos vai depender dos objetivos do projeto e das facilidades disponíveis em cada um destes sistemas.

Neste estágio coloca-se também a questão do formato em que esta integração se dará. O formato **matricial** (*raster*) consiste em organização dos dados na forma de malha com linhas e colunas espaçadas regularmente, formando células. Este é o formato no qual as imagens de

satélite são captadas e processadas, sendo que as células são os pixels aos quais está associado um valor. O formato **vetorial** (*vector*) é constituído por entidades como linhas e polígonos formados por pontos que são definidos por pares de coordenadas (x,y).

A maioria dos sistemas possuem facilidades de conversão de um formato para outro. O formato *raster* é a melhor maneira de representar dados espaciais que variam continuamente, mas podem também ser usados para informações temáticas, por exemplo, tipos de solo ou tipos de rocha. Falhas geológicas, rios, estradas podem também ser representados, desde que os pixels sejam menores do que a largura destas feições (Drury, 1987).

Townshend, J.R. e Justice, C. (1981) apontam algumas possibilidades de integração SR/SIG sempre na direção SR → SIG. Entretanto, se a opção for pelo formato *raster*, o caminho inverso poderá ser mais interessante, tendo em conta as facilidades de processamento no formato *raster* existentes nos *softwares* de processamento de imagens. A incorporação de dados de mapas via SIG é uma das formas de superar as limitações da classificação digital acima mencionadas e pode ser de grande valia na consecução dos objetivos colimados.

A introdução de dados de mapas pode ser efetuada em três fases distintas: antes (estratificação), durante (extensão do vetor) e após (seleção posclassificatória) à classificação (Hutchinson, C.F., 1982):

a - Estratificação (Stratification)

Este método envolve a subdivisão da imagem em áreas menores ou estratos, de forma que os estratos possam ser processados independentemente. Este processo é desenvolvido antes da classificação com o propósito de aumentar a homogeneidade dos dados ou separar materiais distintos que são espectralmente similares. Exemplos

de estratificação foram descritos por Strahler, A.H., (1981), Rhode, W.G. (1978) e Pettinger, L.R. (1981).

b - Extensão do Vetor (Vector Extension)

Consiste na adição de informações de mapas na forma de uma banda "pseudo-espectral", resultando no aumento da dimensionalidade dos dados (Strahler et al., 1980). Assim, por exemplo, se as bandas 3,4 e 5 do LANDSAT/TM forem selecionadas para uma determinada classificação, e deseja-se introduzir informações relativas à topografia da área, os dados de elevação são adicionados de modo que o padrão para um determinado pixel (x,y) com os

níveis de cinza representados por z será: z1(banda 3), z2(banda4), z3(banda5) e z4(altitude).

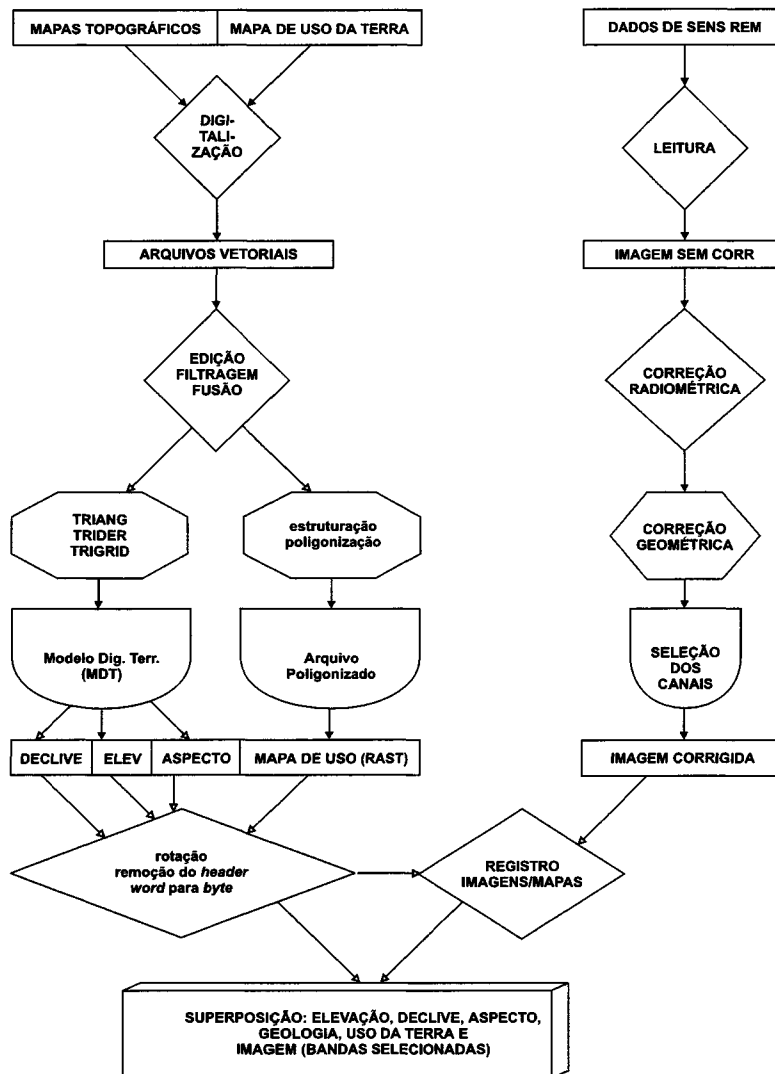
c - Seleção Pós-classificatória (Post-classification Sorting)

Consiste na alteração da classe de um pixel já classificado com base em critérios definidos por informações ancilares.

O processo de integração de informações de mapas aos dados de SR passa necessariamente pelo processo de **retificação** da imagem para determinada projeção do mapa e ajuste à escala desejada através da **reamostragem** dos pixels. Após a retificação, a imagem estará

geometricamente corrigida e georeferenciada e poderá ser superposta aos mapas digitais gerados em um SIG.

Antes disso, porém, as informações de mapas (analógicos) deverão ser convertidas em arquivos digitais. Os mapas temáticos formados por informações categóricas (exemplo: geologia, pedologia, vegetação, uso da terra, etc.) são geralmente espacializados em polígonos (formato vetorial) podendo depois serem convertidos ao formato matricial. As informações contínuas (elevação, declividade, aspecto) são geralmente geradas no formato matricial a partir de um Modelo Digital de Terreno - MDT. A Figura mostra o fluxograma de um projeto de integração SR/SIG descrito por Veronese (1993).



De posse das imagens e arquivos de mapas corretamente superpostos, as técnicas acima descritas podem ser implementadas. Para isso poderá ser necessário um domínio mínimo da linguagem do *software*, utilizado (geralmente FORTRAN ou C) para a introdução de regras simples de decisão nos algoritmos de classificação. Na técnica **extensão do vetor**, o algoritmo de classificação incluirá os valores ancilares nas regras de decisão. Entretanto, é necessário o cuidado de normalizar os valores ancilares para que se tornem compatíveis com o intervalo dinâmico das imagens (geralmente 0 a 255). Exemplo: se a banda ancilar expressar valores de altitude que variam de 380 a 720 m, este intervalo de 340 m deverá ser normalizado para o intervalo 0-255 onde zero será equivalente a 380 m, 255 equivalerá a 720 m.

A técnica de **estratificação** poderá ser aplicada, tanto a informações ancilares categóricas quanto contínuas. Uma das possibilidades é equiparar a zero os pixels das áreas que se pretende excluir. As regras a serem adicionadas ao algoritmo de classificação para estratificar áreas topograficamente distintas, nas quais verifica-se que acima de uma determinada cota certas classes (A, B, e C, por exemplo) não ocorrem, seriam:

- 1 - adicionar o mapa de elevação às demais bandas (banda ancilar);
- 2 - estabelecer uma cota (x) acima da qual certas classes não ocorrem; e
- 3 - incluir as regras de decisão pertinentes no algoritmo de classificação.

Exemplo: **(IF) se o pixel na banda ancilar tiver valor acima de x**

(THEN) excluir as classes A, B e C como candidatas ao pixel.

O mesmo esquema pode ser usado para classificar determinados polígonos, extraídos de mapas ou mesmo da própria imagem, com base nas informações ancilares. A adição de uma banda com dados não-espectrais pode ser usada também para

estabelecer prioridades prévias (*prior probabilities*) em áreas ou polígonos específicos (Strahler, 1980).

Todos os procedimentos acima descritos podem, também, ser usados para modificar a classificação de pixels em imagens já classificadas (seleção pós-classificatória). As vantagens do método pós-classificatório são: i) poder observar as confusões ocorridas entre as classes para definir os critérios para modificações da classificação; e ii) restringir-se às classes-problema, ao invés de checar todos os pixels da imagem.

Discussão

A integração do PDI com as operações espaciais georeferenciadas em SIGs vem adicionar uma dimensão nova ao processamento de informações para análises territoriais, levantamentos de recursos naturais e monitoramento ambiental. O aproveitamento do acervo de informações contidas nos mapas temáticos, modificados e atualizados com base nos dados de satélite, tende a impor-se como a única forma competitiva de se desenvolver levantamentos e estudos nesta área (Davis e Simonett, 1991; Ehlers, Edwards e Bedard, 1989). Este potencial é ainda reforçado pelo crescimento acelerado da capacidade de armazenamento e processamento dos sistemas computacionais.

Por outro lado, não se deve esquecer os avanços na área de *software*. Quanto às limitações apontadas no campo da classificação digital, deve-se chamar a atenção para o progresso das pesquisas voltadas para a correção ou minimização de todas as fontes de erros acima mencionadas. As variações devido à topografia podem ser parcialmente corrigidas por várias técnicas de remoção do efeito topográfico (Civco, 1989; Colby, 1991). O efeito do pixel misto é objeto de investigação através de técnicas denominadas *mixture modelling* (Adams, Smith e Johnson, 1986; Drake e Settle, 1989). Estudos temporais forne-

cem indicativos das nuances devidas à fenologia das plantas e ao estágio de crescimento e maturação das culturas. Além disso, investiga-se métodos alternativos de classificação, independentes dos modelos de distribuição estatística denominados de métodos não-paramétricos (Skidmore e Turner, 1988), *neural network* (Benediktsson, Swain e Ersoy, 1990; Foody e McCulloch, 1992), *fuzzy logic* (Fisher e Pathirana, 1990; Wang, 1990), *evidential reasoning* (Lee, Richards e Swain, 1987; Peddle e Franklin, S.E., 1992 e 1993; Srinivasan e Richards, 1990) alguns já incorporados aos *softwares* disponíveis no mercado. Outras linhas de pesquisa de ponta avançam para modelos mais complexos nos quais as informações extraídas das imagens e de outras fontes externas a elas não armazenadas e processadas de forma a criar um acervo de conhecimento das classes de interesse. Este conhecimento é então utilizado para classificar a imagem através de algoritmos desenhados para tomar decisões de forma semelhante ao raciocínio humano (*knowledge-based approach*); (Argilas e Harlow, 1990; Bolstad e Lillestrand, 1992; Davis, 1986). Com isso a classificação de imagens integra-se aos avanços do campo da inteligência artificial (Erikson e Likens, 1984; Skidmore, 1989).

A utilização do processamento digital nos estudos de recursos naturais e meio ambiente deve ser vista como uma evolução do *modus faciendi* e representa a maneira moderna de executar os estudos e levantamentos. Talvez haja ainda um longo caminho a percorrer até a completa incorporação dos métodos informatizados às sistemáticas de trabalho. As dificuldades experimentadas na implementação das técnicas podem, na maioria das vezes, ser atribuídas: i) à falta de preparo teórico e *know-how* das equipes executoras, que não conseguem um total aproveitamento dos recursos disponíveis nos *softwares*; e ii) às dificuldades de compatibilização entre os *softwares* e conseqüente falta de integração SR/

SIG; e iii) à resistência das chefias ou das próprias equipes em mudar os métodos. Na verdade, a informatização dos métodos pode representar uma mudança profunda de procedimentos já estabelecidos e arraigados e, portanto, exigem um esforço grande de atualização e reciclagem das equipes, respaldado na compreensão e apoio das chefias.

Conclusões

Em conclusão, pode-se afirmar que PDI constitui uma ferramenta de grande utilidade no apoio aos levantamentos e estudos sistemáticos de recursos naturais, tendo em vista: i) os recursos para melhoria na visualização das imagens; ii) a automatização do pro-

cesso de interpretação (classificação) com as vantagens da rapidez e utilização de critérios uniformes para toda a imagem; e iii) possibilidades de incorporação de informações de mapas na forma digital.

As limitações na área da classificação tendem a ser superadas pelo desenvolvimento de novas técnicas com capacidade para tratar dados de diferente natureza, independentes de modelos estatísticos e mais eficientes para lidar com a incerteza. As pesquisas avançam rapidamente para modelos de classificação que, utilizando indicativos de várias fontes, constroem, através de seqüência de deduções lógicas e heurísticas, as evidências para a classificação de pixels ou zonas (porções da imagem) de forma semelhan-

te ao raciocínio humano (Hayes-Roth, 1984; Mckeown, 1987). Esta evolução envolve a completa integração de informações de fontes externas ao SR, principalmente mapas digitalizados, propiciando por um lado o refinamento da classificação e por outro a atualização dos mapas. Vale lembrar que todos estes arquivos podem ser facilmente copiados, editados, exibidos em tela, transferidos para outras unidades e plotados.

Por tudo isso pode-se afirmar que o PDI, juntamente com os outros processamentos de dados espaciais georeferenciados, vieram para ficar e que somente sobreviverão as equipes que melhor se capacitarem para abraçar os métodos informatizados de processamento, geração de informações e apresentação dos resultados dos projetos.

Bibliografia

- ADAMS, J. B., SMITH, M. O., JOHNSON, P. E. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the viking lander 1 site. *Journal of Geophysical Research: solid earth*, v. 91, n. B8, p. 8098-8112, 1986.
- ARGIALAS, P. D., HARLOW, C. A. Computational image interpretation models: an overview and a perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 56, n. 6, p. 871-886, Jun. 1990.
- BENEDIKTSSON, J. A., SWAIN, P. H., ERSOY, O. K. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v. 4, n. 28, p. 540-551, 1990.
- BOLSTAD, P. V., LILLESAND, T. M. Rule-based classification models: flexible integration of satellite imagery and thematic spatial data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 58, n. 7, p. 965-971, Jul. 1992.
- CIVCO, D. L. Topographic normalization of LANDSAT thematic mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 55, n. 9, p. 1303-1309, Sept. 1989.
- COLBY, J. D. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 57, n. 5, p. 531-537, May 1991.
- DAVIS, F. W., SIMONETT, D. S. GIS and remote sensing. In: MAGUIRE, D., GOODCHILD, M. D., RHIND, D. W. (Eds.). *Geographical Information Systems*. London: Longman Group UK, 1991. p. 191-213.
- DAVIS, R. Knowledge-based systems. *Science*, Washington, n. 231, p. 957-963, 1986.
- DRAKE, N. A., SETTLE, J. J. Linear mixture modelling of thematic mapper data of the peruvian Andes. In: EARSEL SYMPOSIUM, Helsinki, 1989. *Proceeding...* 1989. p. 490-495.
- DRURY, S. A. *Image interpretation in Geology*. London: Allen & Unwin, 1987.
- EHLERS, M., EDWARDS, G., BEDARD, Y. Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 55, n. 1, p. 1619-1627, Jan. 1989.
- ERICKSON, W. K., LIKENS, W. C. An application of expert systems technology to remotely sensed image analysis. In: IEEE PROCEEDINGS OF PECORA SYMPOSIUM, 9., 1984. p. 258-276.

- FISHER, P. F., PATHIRANA, S. The evaluation of fuzzy membership of land cover classes in the suburban zone. *Remote Sensing of Environment: an interdisciplinary journal*, New York, n. 34, p. 121-132, 1990.
- FOODY, G. M., MCCULLOCH, M. B. An assessment of an artificial neural network for image classification. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE REMOTE SENSING SOCIETY, 18., 1992, Dundee. *Proceedings...* Dundee. 1992. p. 498-507.
- HAYES-ROTH, F. Knowledge-based expert systems. *Computer*, Los Alamitos, v. 10, n. 17, p. 263-273, 1984.
- HOLBEN, B. N. et al. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 46, n. 9, p. 1191-1200, Sept. 1980.
- HUTCHINSON, C. F. Techniques for combining LANDSAT and ancillary data for digital classification improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 48, n. 1, p. 123-130, Jan. 1982.
- INCE, F. Maximum likelihood classification, optimal or problematic? A comparison with nearest neighbour classification. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 8, n. 12, p. 1829-1838, 1987.
- JENSEN, J. R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- LEE, T., RICHARDS, J. A., SWAIN, P. H. Probabilistic and evidential approaches for multisource data analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v. 3, n. 25, p. 283-293, 1987.
- MATLELA, M. S., VERONESE, V. F. Selection of the optimal subset of spectral bands for land-cover/land-use classification. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE REMOTE SENSING SOCIETY, 16., 1990. *Proceedings...* Swansea, 1990. p. 325-333.
- MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images*. Chichester: Wiley, 1987.
- MAUSEL, P. W., KRAMBER, W. J., LEE, J. K. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 56, n. 1, p. 55-60, Jan. 1990.
- MCKEOWN, D. M. The role of artificial intelligence in the integration of remotely sensed data with geographic information systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v. 3, n. GE-25, p. 330-347, 1987.
- NOVO, E. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308 p.
- PEDDLE, D. R., FRANKLIN, S. E. Multisource evidential classification of surface cover and frozen ground. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 13, n. 17, p. 3375-3380, 1992.
- _____. Classification of permafrost active layer depth from remotely sensed and topographic evidence. *Remote Sensing of Environment: an interdisciplinary journal*, New York, v. 44, p. 67-80, 1993.
- PETTINGER, L. R. Environmental stratification: a method to improve LANDSAT digital analysis accuracy and land cover map utility. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 14., 1981, Ann Arbor, MI. *Proceedings...* 1981. p. 1587-1600.
- RHODE, W. G. Improving land cover classification by image stratification of LANDSAT data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 12., 1978, Ann Arbor, MI. *Proceedings...* Ann Arbor, 1978. p. 729-741.
- ROSA, F. S. Softwares de geoprocessamento. *Quem é quem*. Fator GIS. Curitiba, v. 8, n. 2, p. 21-24, 1995.
- SETTLE, J. J., DRAKE, N. A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 12, 1991.
- SKIDMORE, A. K. An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 55, n. 10, p. 1449-1464, Oct. 1989.
- _____, TURNER, B. J. Forest mapping accuracies are improved using a supervised nonparametric classifier with SPOT data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v. 54, n. 10, p. 1415-1421, Oct. 1988.
- SRINIVASAN, A., RICHARDS, J. A. Knowledge-based techniques for multi-source classification. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 11, n. 3, p. 505-525, 1990.
- STRAHLER, A. H. et al. Incorporating collateral data in LANDSAT classification and modeling procedures. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 14., 1980, Ann Arbor, MI. *Proceedings...* Ann Arbor, 1980. p. 1009-

1026.

STRAHLER, A. H. Stratification of natural vegetation for forest and rangeland inventory using LANDSAT digital imagery and collateral data. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 2, n. 1, p. 15-41, 1981.

_____. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment: an interdisciplinary journal*, New York, v. 10, p. 135-163, 1980.

SWAIN, P. H., RICHARDS, J. A., LEE, T. Multisource data analysis in remote sensing and geographic information processing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 11., 1985. *Proceedings...* 1985. p. 211-218.

TOWNSEND, J. R. G. Agricultural land-cover discrimination using thematic mapper spectral bands. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 5, n. 4, p. 681-698, 1984.

_____, Information extraction from remotely sensed data: a user view. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 2, n. 4, p. 313-329, 1981.

VERONESE, V. F. *The incorporation of ancillary information to improve land-cover classification: a remote sensing/GIS interface approach*. Nottingham, 1993. 241 p. Tese (Doutorado) - University of Nottingham, Grã-Bretanha, 1993.

WANG, F. Improving remote sensing image analysis through fuzzy information representation. *Photogrammetric Engineer-*

ing and Remote Sensing, Fall Church, v. 56, n. 8, p. 1163-1169, Aug. 1990.

Resumo

O artigo aborda as dificuldades de se incorporar os processos automatizados de análise de dados de Sensoriamento Remoto às sistemáticas de estudos de recursos naturais e meio ambiente. Para isso, apresenta-se um resumo dos principais recursos técnicos utilizados em processamento digital de imagens e as limitações das técnicas presentemente utilizadas para a classificação digital. A seguir, descreve-se algumas técnicas para refinar a classificação, através da incorporação de informações de mapas digitalizados e discute-se as tendências futuras da informatização dos procedimentos para a análise de informações espaciais georreferenciadas.

Abstract

The difficulties to incorporate digital processing of Remote Sensing data for natural resources and environmental analysis are examined in this paper. For that purpose, the most common image processing techniques are briefly explained and the drawbacks of the digital classification techniques presently used are described. The methods to overcome those difficulties and some techniques to improve classification by the incorporation of map information are then described and the present trends of the spatial georeferenced analysis by computer processing are examined.