

PROCESSAMENTO DE IMAGENS: TÉCNICAS, POTENCIAL DE APLICAÇÕES E ATIVIDADES ATUAIS NO INPE

Nelson D.A. Mascarenhas

Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201, São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo

Este artigo apresenta um "tutorial" sobre a área de processamento digital de imagens. Os principais itens cobertos incluem: amostragem e quantização; realce; restauração e reconstrução; codificação e análise de imagens. São também apresentados os trabalhos atualmente em desenvolvimento no Instituto de Pesquisas Espaciais nesta área.

IMAGE PROCESSING: TECHNIQUES, POTENTIAL FOR APPLICATIONS AND PRESENT ACTIVITIES AT INPE

Abstract

This article presents a tutorial about the area of digital image processing. The main covered topics include: sampling and quantization; enhancement; restoration and reconstruction; coding and image analysis. The activities under development at the Space Research Institute in this area are also presented.

I - PROCESSAMENTO DE IMAGENS

1.1 - INTRODUÇÃO

Dentre as aplicações que a tecnologia digital possibilita no presente, podem ser mencionadas aquelas voltadas para a análise de dados bidimensionais, colhidos por diversos tipos de sensores. Tais aplicações têm recebido usualmente o nome de Processamento Digital de Imagens. Este termo é reservado para as aplicações onde a entrada é uma imagem e a saída também é uma imagem. No caso de reconhecimento de padrões, a entrada do processo é uma imagem, mas a saída é uma classificação ou sua descrição, embora, frequentemente, uma tarefa do tipo processamento de imagens (pré-processamento, em geral) venha a ser executada como parte do reconhecimento. Já no caso das aplicações gráficas por computador (computer graphics), a entrada do processo é uma descrição da imagem, a qual é obtida como saída.

O processamento e a análise digital de imagens tem tido um papel importante em áreas como: Sensoriamento Remoto, Meteorologia e Cartografia; Telecomunicações (digitalização do sinal de TV, fac-símile, teleconferência, videofone); Biomedicina (radiografia digital, tomografia, medicina nuclear, ultrassom, imagens de células ou cromossomos); aplicações industriais (visão robótica, radiografias industriais, testes não-destrutivos de materiais), etc.

Uma tendência recente no campo de processamento digital de imagens tem sido a utilização de técnicas de inteligência artificial. O objetivo, em última análise, é obter uma integração do processamento numérico e do simbólico para obter sistemas de processamento de imagens baseados em representação do conhecimento.

Além disso, as técnicas de processamento de imagens derivam de um grande número de disciplinas, incluindo, entre outras, Ótica, Neurofisiologia, Colorimetria, Engenharia Elétrica e Ciência da Computação.

Esta exposição será orientada para cobrir os aspectos mais ligados às duas últimas disciplinas, particularmente aqueles ligados à área de Processamento de Sinais. Ao final, será apresentado um breve resumo dos trabalhos em andamento no Instituto de Pesquisas Espaciais.

1.2 - AMOSTRAGEM E QUANTIZAÇÃO

Para processar uma imagem por computador, a função de duas variáveis que caracteriza a luminância é normalmente amostrada numa grade regular, e os valores resultantes são discretizados num número finito de níveis de cinza. Imagens a cores requerem três componentes (por exemplo: azul, verde e vermelho), que são amostradas e quantizadas de maneira análoga. Em muitos casos, uma imagem consiste numa matriz de 512 x 512 elementos denominados

"pixels" (abreviatura do inglês "picture elements"), cada um possuindo 64 níveis de cinza. Também é usual trabalhar com imagens binárias, como em aplicações industriais ou em fac-símile de documentos.

Se a imagem original apresenta detalhes muito finos, esta informação de alta frequência espacial será perdida se a amostragem tiver grande espaçamento. De acordo com o teorema da amostragem, a mínima taxa de amostragem necessária para a reprodução fiel de um sinal é o dobro da máxima frequência nele contida. A amostragem insuficiente de sinais pictóricos causa o chamado fenômeno de "aliasing", que provoca o aparecimento de estruturas espúrias na imagem, denominadas padrões de Moiré.

A quantização dos elementos resultantes da amostragem pode ser feita de maneira não-uniforme ("tapered quantization"). Pelo menor espaçamento dos níveis de cinza na faixa em que estes ocorrem mais frequentemente, é possível minimizar o erro de quantização. Um número insuficiente de níveis de cinza irá provocar o aparecimento dos chamados falsos contornos, que apresentam transições bruscas de tonalidade, que originalmente eram suaves.

1.3 - REALCE

As técnicas de realce de imagens são utilizadas, em geral, para melhorar a qualidade da imagem sob critérios subjetivos de avaliação do observador humano. Podem também servir como uma etapa de pré-processamento para sistemas de reconhecimentos de padrões.

É frequente ocorrer a situação em que, após a digitalização da imagem (amostragem e quantização), os níveis de cinza ocupem apenas uma pequena parte da variação disponível. Por um processo de modificação da escala de cinza, é possível espalhar a distribuição desses níveis, tornando a informação existente mais visível ao olho humano. Tais métodos são também chamados de manipulação do contraste e envolvem o mapeamento linear ou não-linear (por exemplo: utilizando saturação) dos níveis originais, através do uso de tabelas.

A redistribuição dos níveis de cinza pode ter também como objetivo uma alteração do histograma da imagem, de modo a que este adquira uma forma desejada, que poderá ser uniforme ou ainda exponencial ou hiperbólica, levando em conta as características do sistema visual humano.

Uma imagem é frequentemente afetada por ruído ou interferência proveniente de várias fontes. Uma possível abordagem deste problema envolve a aplicação de técnicas estatísticas de estimação e filtragem ótima. Tais métodos exigem, em geral, uma caracterização da imagem original e da fonte de ruído por descrições probabilísticas, através de campos aleatórios, levando ao projeto dos filtros de Wiener ou de Kalman (filtragem recursiva). Entretanto, tais caracterizações são, por vezes, difíceis de ser obtidas e,

na prática, recorre-se então a técnicas de filtragem *ad hoc*. Assim, processos de limpeza de ruído podem ser aplicados envolvendo a imagem original com máscaras de coeficientes que possuam a característica de atenuar as altas frequências, onde o ruído é geralmente preponderante sobre o sinal, ou então, no caso mais simples, substituindo o ponto central de uma vizinhança 3x3 ou 5x5 "pixels" de uma imagem pela média nesta vizinhança. O preço que se paga neste processamento é, em geral, uma suavização das variações da imagem. É possível aliviar este problema por um tipo de filtragem não-linear denominado filtro de mediana em que, numa janela com número ímpar de "pixels", o ponto central é substituído pela mediana dos valores observados.

Técnicas de realce de bordas tendem a aumentar a visibilidade de contornos de baixo contraste na imagem e a percepção de detalhe. Uma das operações mais simples para conseguir tal efeito é subtrair da imagem uma versão borrada dela mesma. A idéia subjacente é que esta versão contém essencialmente as componentes de baixa frequência da imagem, do que resulta uma filtragem passa-altas. Tal método é conhecido como "unsharp masking" e é utilizado por fotógrafos em seus processos de ampliação de negativos. Outras possíveis operações de realce de bordas consistem na aplicação de filtragem passa-altas por meio de máscaras convolucionais. É possível obter aproximações digitais dos operadores gradiente ou laplaciano que são utilizadas também em detecção de bordas, a ser tratada com mais detalhes na seção sobre análise de imagens.

Através de um modelo em que a luminância da imagem é encarada como o produto de um fator de iluminação por outro de reflectância, pode-se realçar este último pela utilização das técnicas de filtragem homomórfica, que podem incorporar também modelos estatísticos para os processos envolvidos. Neste ponto, a área de Processamento de Imagens tangencia a de Filtragem Digital Bidimensional, que tem sido objeto de intensas investigações nos últimos anos.

A habilidade do olho humano em distinguir um número muito maior de cores do que tons de cinza conduziu ao desenvolvimento de técnicas de realce a pseudocor, onde os tons de uma imagem em branco e preto são mapeados para o espaço de cores.

Muitos sistemas óticos exibem pronúncia das distorções geométricas. Tal é o caso de câmeras de "vidicon" ou rastreadores multiespectrais a bordo de satélites, cuja atitude em relação à Terra é variável. Surge, portanto a necessidade de corrigir tais distorções. Se as causas das distorções são perfeitamente conhecidas é possível, em princípio, aplicar a transformação inversa para remover estas distorções. Em outros casos, o modelo da distorção não é completamente disponível e são então utilizados os chamados pontos de controle, que são pontos característicos (por exemplo: intersecções de estradas em imagens aéreas), cuja localização é perfeitamente conhecida. Modelada-se, então, a transformação

por polinômios cujos coeficientes são determinados por sistemas de equações lineares. Uma vez estabelecido o mapeamento inverso da imagem corrigida para a imagem distorcida, resta o problema de interpolar, na imagem distorcida, os valores de luminância no interior da grade correspondente aos valores inteiros na grade da imagem corrigida. Vários métodos de interpolação para este processo (denominado reamostragem) têm sido propostos. O processo de determinar pontos de controle correspondentes nas duas imagens pode ser feito de maneira automática, utilizando técnicas de registro de imagens a serem abordadas na seção de análise de imagens.

1.4 - RESTAURAÇÃO E RECONSTRUÇÃO

Enquanto as técnicas de realce de imagens têm muitas vezes um caráter *ad hoc*, pelo fato de se basearem num critério subjetivo de avaliação, os processos de restauração e reconstrução de imagens podem ter uma formalização matemática mais rigorosa, pois se baseiam em critérios de avaliação objetivos. Contudo, se estes problemas admitem uma solução formal, sua implementação em computador pode ser bastante dificultada pelo esforço computacional exigido ao lidar com problemas bidimensionais. O problema de restauração de imagens refere-se à tarefa de estimar a imagem original que sofreu um processo de degradação que envolve espalhamento da luz e contaminação por ruído. Estes problemas ocorrem em imagens tiradas próximas ao limite de resolução de instrumentos (Astronomia, Microscopia Eletrônica, imageamento por satélites ou mesmo Radiografia Médica) ou ainda em condições adversas (movimento ou turbulência).

Se a imagem original sofreu um processo de "borramento", é possível modelar tal processo através de uma equação de convolução, supondo as condições ideais de linearidade e invariância no espaço. Assim sendo, tomando a Transformada de Fourier, verifica-se que é possível, em princípio, recuperar a imagem original pela razão entre as Transformadas de Fourier da imagem borrada e da função de espalhamento. Surgem dois problemas com a utilização deste método:

- 1) A Transformada de Fourier da função de espalhamento (função de transferência) pode ter zeros, e o filtro inverso não seria realizável, havendo necessidade de fazer uma realização aproximada.
- 2) A inevitável presença do ruído faz com que o resultado fique completamente mascarado nas frequências espaciais, nas quais o ruído, que geralmente contém componentes de alta frequência, predomina. Pode-se aliviar o problema pelo truncamento do filtro a frequências mais baixas.

Tal situação está intimamente ligado ao fato de a chamada equação integral de convolução, que caracteriza o borramento da imagem, ser essencialmente um problema mal condicionado, no sentido de que pequenas perturbações na imagem borrada podem provocar enor-

mes variações na imagem restaurada. A única solução para este tipo de problema está no uso de conhecimento a priori sobre a imagem original.

Este conhecimento pode ser de dois tipos: determinístico ou estatístico. No primeiro caso, podem ser utilizados os chamados métodos de regularização, onde se minimiza uma expressão quadrática que mede a rugosidade da solução. Pode-se mostrar que a solução obtida é equivalente àquela que seria obtida pela utilização de conhecimento estatístico na formulação de Wiener, descrita adiante. Deve-se notar, aqui, que o problema de Restauração de imagens é basicamente um problema de deconvolução, que aparece frequentemente nas ciências físicas. No caso de imagens, o problema se torna mais difícil pela enorme carga computacional que pode advir do fato de se tratar de uma situação bidimensional.

No caso de a função de espalhamento ser invariante no espaço, é possível reduzir substancialmente esta carga pelo uso da Transformada de Fourier ("FFT - Fast Fourier Transform"). Esta Transformada, ao lado de outros algoritmos de rápida execução, como Transformadas de Walsh-Hadamard, do cosseno e "slant", desempenha um importante papel em processamento de imagens ou de sinais, de modo geral. Outras aplicações da Transformada Rápida de Fourier e de suas congêneres serão examinadas na Seção 1.5 sobre codificação.

A possibilidade de usar conhecimento determinístico a priori para combater o mau condicionamento também pode ser explorada na forma de restrições de desigualdade. Uma restrição natural que ocorre em imagens reside no fato de valores de luminância serem necessariamente não-negativos. Pela utilização do critério de mínimos-quadrados, pode-se mostrar que daí resulta um problema de programação quadrática. Todavia, o esforço computacional exigido só permite lidar com imagens de pequena resolução ou em áreas localizadas.

O conhecimento a priori do tipo estatístico pode ser incorporado através dos dois primeiros momentos da imagem original e do ruído. Nestas condições, a estimação ótima é dada pelo filtro de Wiener, que também pode ser implementado de maneira eficiente usando a Transformada Rápida de Fourier. Tem havido recentemente tentativas de implementar métodos de restauração não-linear, levando em conta, por exemplo, as características do processo de emulsão fotográfica.

O problema de reconstruir uma imagem por suas projeções tem atraído muita atenção nos últimos anos, particularmente devido à sua aplicação na área de Tomografia Computadorizada. Este problema tem uma estrutura matemática semelhante à da restauração de uma imagem. Nos dois casos, as observações resultam de uma combinação linear dos valores da imagem original, além da presença inevitável do ruído.

Assim sendo, um dos tipos de abordagem tem características próximas às dos métodos de restauração; são as chamadas técnicas al-

gêbricas, equivalentes a resolver um grande sistema de equações lineares. Como no caso de restauração, elas podem ser encaradas de um ponto de vista determinístico ou estatístico. Esta última formulação pode levar a esquemas recursivos do tipo filtragem de Kalman, onde a reconstrução é atualizada a cada novo conjunto de medidas tomadas.

A possibilidade de usar as ferramentas da Transformada Rápida de Fourier para reconstrução advém do seguinte resultado: dada uma imagem f com uma Transformada de Fourier bidimensional F , se f^θ é a projeção de f segundo uma direção θ , o que foi obtido somando os valores da imagem ao longo desta direção, então a Transformada de Fourier unidimensional desta projeção é um corte de F através da origem do plano de frequências na direção $\theta + \pi/2$. Deste modo, pode-se obter uma aproximação de F por várias projeções e reconstruir a imagem pela Transformada Inversa de Fourier.

1.5 - CODIFICAÇÃO

Um dos objetivos dos processos de codificação de imagem é reduzir a quantidade de informação necessária para representar uma imagem com a finalidade de diminuir o tempo, a largura de faixa ou a potência necessários para transmitir a imagem, ou o volume de memória para armazená-la. Este artigo apresenta, a seguir, um breve resumo das principais técnicas de codificação utilizadas em imagens.

As técnicas de codificação podem ser exatas, no sentido de possibilitarem uma exata reconstrução da imagem original, ou aproximadas, que causam alguma distorção, muitas vezes quase imperceptível ao olho humano.

Dentre as técnicas exatas, podem ser mencionadas aquelas referentes ao:

- a) código de Huffman: se os níveis de cinza da imagem não são distribuídos uniformemente, é possível associar uma palavra de código mais curta aos níveis mais frequentes, de modo a reduzir o número médio de bits necessário para representar a imagem;
- b) código de comprimento de corrida: se os níveis de cinza ao longo de uma linha da imagem tendem a ser constantes, por um comprimento suficientemente longo, é possível utilizar este fato, caracterizando a imagem pelos comprimentos dessas corridas e pelos níveis de cinza a elas associados;
- c) código de contornos: se uma imagem é constituída por regiões homogêneas conectadas, uma representação econômica consiste em codificar os contornos das regiões e os níveis de cinza de cada uma delas.

Uma das possibilidades de aproximar a representação de uma imagem consiste em tirar proveito das limitações da visão humana. Assim, em regiões onde o nível de cinza varia lentamente, a amostragem pode ser mais

espaçada, o mesmo ocorrendo com a quantização em regiões onde a flutuação é rápida. Este método pode ser implementado tanto no domínio do espaço quanto no domínio da frequência, amostrando espaçadamente as componentes da Transformada de Fourier da imagem em baixas frequências, o mesmo sendo feito com relação à quantização das frequências altas.

A redundância existente devida à correlação entre os "pixels" adjacentes da imagem pode ser explorada pelas chamadas técnicas preditivas, onde é codificado o sinal resultante da diferença entre os "pixels" adjacentes, ou da diferença entre o "pixel" e a predição dele baseada nos "pixels" adjacentes na mesma linha (predição unidimensional) e em linhas adjacentes (predição bidimensional). A possibilidade de redução do número de bits de correção da distribuição fortemente não-uniforme do sinal-diferença (apresentando um pico em valores baixos), o que permite o uso do código de Huffman. Além disto, as grandes amplitudes tendem a variar rapidamente, o que é aproveitado por uma quantização espaçada. As técnicas diferenciais podem envolver apenas 1 bit na quantização do sinal-diferença (modulação delta), ou mais de 1 bit (DPCM - "differential pulse code modulation"). Estas técnicas são de implementação simples, mas apresentam o problema de propagação de eventuais erros na transmissão da imagem.

O uso de transformadas de imagens tem sido bastante explorado para efetuar uma compressão de dados pictóricos. As Transformadas de Fourier, Walsh-Hadamard, cosseno e "slant" têm oferecido reduções de 10:1 ou mais na taxa de transmissão. Outra transformação possível, que tem propriedades de otimalidade, é a de Karhunen-Loève, mas tem a desvantagem de não possuir uma implementação por meio de algoritmos rápidos, como é o caso das transformações anteriores, com exceção do caso em que a imagem possui uma função de correlação separável nas direções horizontal e vertical e de tipo markoviana.

Nesse tipo de codificação, o fato de a transformação da imagem ser compressível é fundamental. Por exemplo, na Transformada de Fourier, os coeficientes de frequências mais baixas têm, em geral, grandes amplitudes, e o oposto ocorre com as frequências altas, de modo que os coeficientes devem ser quantizados conforme sua amplitude. Estas observações estão de acordo com os métodos aproximados de digitalização para compressão, mencionados anteriormente. As técnicas de codificação por transformadas, embora de implementação mais complexa que as técnicas de diferença, têm a vantagem de distribuir os efeitos de erros de transmissão, tornando-os menos visíveis. Deve-se mencionar, neste ponto, que técnicas híbridas, que empregam métodos diferenciais e de transformadas, também têm sido desenvolvidas.

As técnicas de codificação podem ser estendidas a imagens com características especiais, como imagens binárias de texto e gráficos, imagens a cores ou multiespectrais, ou

ainda, sucessivos quadros de imagens de TV, onde uma pequena fração do número de pontos sofre mudança (codificação entre quadros) de quadro para quadro.

Os limites dos métodos de codificação são estabelecidos pela teoria de razão de distorção. Todavia, além de não especificar como projetar os métodos de codificação para atingir estes limites, esta teoria sofre das deficiências no modelamento estatístico realístico da fonte de sinal (imagens) e no estabelecimento de um critério de fidelidade de que, simultaneamente, seja tratável do ponto de vista matemático e leve em conta as características complexas do sistema visual humano.

1.6 - ANÁLISE DE IMAGENS

A área de análise de imagens engloba várias subáreas mais ou menos independentes, que serão tratadas brevemente nesta seção.

Algoritmos para detectar bordas em imagens podem ser uma etapa de pré-processamento em vários sistemas de processamento de imagens e reconhecimento de padrões. São largamente utilizadas as técnicas de diferenciação do tipo gradiente ou laplaciano em suas aproximações digitais, seguidas da comparação com um limiar para decidir a respeito da presença ou não de uma borda local. O problema principal reside na susceptibilidade ao ruído inerente a esses operadores. Para contornar o problema é possível lançar mão de técnicas estatísticas, como filtragem de Wiener, para estimar o laplaciano sob ruído, ou de testes de hipóteses para decidir sobre a presença ou não de algum tipo de borda.

Após a aplicação de operadores locais, poderá ser necessário unir os pontos resultantes de modo a formar uma curva contínua. Vários métodos têm sido propostos para resolver este problema dos quais um dos mais simples envolve a utilização de aproximações poligonais ou polinomiais.

O problema de binarizar uma imagem de tons de cinza ocorre em várias aplicações. Sensores visuais em robôs trabalham muitas vezes com imagens binárias. O procedimento mais natural baseia-se no estabelecimento de um limiar nos níveis de cinza, mas podem surgir problemas quando se deseja detectar um objeto cujos tons não diferem substancialmente do fundo. Neste caso, o uso de propriedades locais como intensidade média ou de limiares dependentes da localização pode ser útil.

O problema de descrever a forma de objetos em imagens tem importância considerável em áreas como aplicações industriais. As técnicas desenvolvidas podem ser de dois tipos:

- a) descrição de regiões que envolve análise dos eixos principais dos objetos ou propriedades geométricas como perímetro e área ou ainda descritores topológicos como o número de Euler, etc.
- b) descrição de periferia como código de cadeias, representações por grafos, descrições

tores de Fourier, etc.

Inúmeras técnicas de análise de textura têm sido desenvolvidas. O problema é relevante em imagens biomédicas ou de sensoriamento remoto, por exemplo. Uma caracterização natural é feita através do espectro de Fourier, mas os resultados até agora não têm sido inteiramente satisfatórios. Outra possível caracterização pode ser feita através das chamadas matrizes de co-ocorrência, as quais envolvem os histogramas bidimensionais dos níveis de cinza para um dado ângulo e uma dada distância de separação entre os "pixels". Entre outros esquemas, poderiam também ser citados aqueles que envolvem a densidade de bordas por unidade de área, os modelos de séries temporais sazonais, ou parametrização do campo aleatório.

O registro preciso de duas imagens tiradas em condições diferentes pode ser necessário em aplicações que vão desde imagens aerospaciais de sensoriamento remoto ou meteorologia até imagens biomédicas. A primeira tentativa para resolver este problema consistiu em efetuar uma correlação entre as duas imagens localizando o ponto máximo. As dificuldades do método residem, principalmente, na imprecisão da determinação do ponto ótimo e no enorme esforço computacional, a despeito do uso da Transformada Rápida de Fourier. Os métodos mais bem sucedidos têm se baseado em esquemas sequenciais, onde a soma do módulo das diferenças entre "pixels" correspondentes para cada posição candidata a registro é comparada com um limiar pré-determinado, de modo a truncar o processo acumulativo rapidamente. É possível reduzir ainda mais a carga computacional pelo uso de imagens de resolução diferentes, num esquema hierárquico.

Para finalizar esta seção, podem ser mencionadas as técnicas de erosão e dilatação de regiões, que permitem simplificar as formas, eliminando lacunas ou pontos isolados. Estes procedimentos têm sido usados em detecção de falhas em inspeção industrial, delineamento de bordas de textura ou análise de células biológicas.

II - ATIVIDADES RECENTES EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NO INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

Os projetos em Processamento Digital de Imagens no INPE estão concentrados nas coordenadorias de Pesquisa Básica em Processamento de Imagens e de Sistemas de Processamento de Imagens.

Sob a primeira coordenadoria desenvolvem-se atualmente os seguintes projetos:

- a) Sistema de Análise Morfológica de Imagens

Tal projeto visa o desenvolvimento da infra-estrutura de "software" para a pesquisa na área de Morfologia de Imagens. A aplicação destas técnicas envolve uma ampla gama de áreas que abrangem não apenas imagens aereas

paciais mas também imagens microscópicas de rivadas de Citologia, Petrografia, Metalografia, Inspeção Industrial, etc. ou mesmo certas etapas necessárias à Visão Robótica.

O "software" proposto está sendo implementado no SITIM (Sistema Interativo de Tratamento de Imagens), baseado em "hardware" nacional, que será descrito com mais detalhes como um projeto da coordenadoria de Sistemas de Processamento de Imagens. Tal "software" é composto dos seguintes módulos básicos:

- 1) Aquisição: realiza a leitura das imagens, eventualmente captadas por um microscópio e pela câmera de TV, digitaliza e carrega as imagens na unidade visualizadora.
- 2) Pré-processamento: corrige distorções radiométricas e ruídos na imagem adquirida, podendo também efetuar um realce dela por meio de uma tabela.
- 3) Transformações Morfológicas e Topológicas: efetuam transformações de interesse (como erosão e dilatação, por exemplo) sobre os objetos pertencentes à imagem, alterando suas formas e, conforme o caso, eliminando-as seletivamente da imagem.
- 4) Extração de Atributos: extrai parâmetros globais (número de objetos, número de Euler, etc.) ou individuais (perímetro, área, excentricidade, etc.) dos objetos presentes na imagem.
- 5) Reconhecimento de Padrões: separa os objetos pertencentes à imagem em classes através dos atributos extraídos no módulo anterior.
- 6) Biblioteca de Aplicativos: apresenta um conjunto de programas que atende às necessidades específicas dos usuários e utiliza as funções definidas nos demais módulos.

A Figura 1 apresenta um resultado visual preliminar do sistema, através da imagem microscópica de uma lâmina petrográfica de rocha sedimentar de arenito. Neste caso o geólogo está interessado em medir a porosidade e a permeabilidade dos poros existentes na lâmina. Como uma etapa do processo, a imagem do lado direito da foto apresenta os resultados de segmentação da imagem do lado esquerdo, seguidos dos processos de dilatação e erosão.

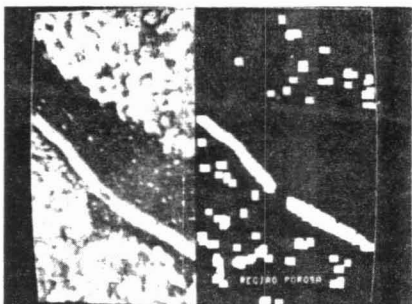


Fig. 1: Imagem microscópica de lâmina de arenito.

b) Sistema para a Determinação de Campos de Ventos, pelo Uso de Satélites Meteorológicos Geoestacionários

Os campos de ventos constituem um conjunto de vetores indicativos da velocidade e da direção do vento numa região e possibilitam o estudo da dinâmica da atmosfera, pois descrevem o escoamento de fluidos nela. Tais campos podem ser obtidos por meio de rastreamento de nuvens em uma sequência de imagens de um satélite geoestacionário, geradas em intervalos de tempo conhecidos. Tem-se, deste modo, uma complementação de dados nos intervalos decorridos entre os lançamentos de radiossondagem, bem como uma obtenção de dados em áreas não-abrangidas por tal método, ou seja, oceanos, montanhas, desertos, etc.

O sistema que está em desenvolvimento no INPE permite a determinação de campos de ventos através do rastreamento de nuvens baixas. Este sistema compõe-se dos seguintes módulos:

- 1) navegação das imagens (determinação da correspondência entre linha e coluna da imagem original com as coordenadas de latitude e longitude); 2) seleção de nuvens candidatas a rastreamento (utilizando o perfil vertical de temperatura da área sob análise e o histograma correspondente, o que indica a presença de nuvens baixas); 3) determinação do deslocamento das nuvens através do registro das imagens (por meio de um método automático, baseado na correlação cruzada); 4) atribuição da altitude da nuvem (que pode basear-se ou em estudos da climatologia da região ou em dados de temperatura da nuvem, da emissividade e do perfil vertical de temperatura); 5) controle de qualidade (que permite a eliminação de vetores incorretos eventualmente gerados pelas etapas anteriores).

Após completada a sua implementação, o sistema de determinação de campos de ventos deverá ser utilizado pelo Departamento de Meteorologia do INPE na obtenção de dados para previsão numérica de tempo e na análise de situações sinóticas individuais.

c) Restauração de Imagens de Satélites de Recursos Naturais e de Radioastronomia

O problema de restauração de imagens ocorre em diversas áreas, conforme mencionado na Seção 1.4 do presente trabalho. A pesquisa de métodos de restauração em andamento atualmente no INPE visa dois objetivos: a) melhoria da resolução de satélites de recursos naturais; b) deconvolução da resposta impulsiva de receptores radioastronômicos devida ao lóbo principal da antena de recepção.

No primeiro caso, para os satélites da série LANDSAT, levam-se em conta fatores como a ótica do telescópio a bordo do satélite, o processo de amostragem dos "pixels" (considerando eventualmente a incerteza do processo de amostragem em relação ao objeto presente na imagem) e a presença de filtros elétricos no sinal resultante para diminuir o fenômeno de "aliasing". A função de transferência de modulação é determinada e realiza-se a deconvolução sob a hipótese de separabilidade da aquela função nas direções horizontal e verti

cal. Estuda-se atualmente o problema de mau condicionamento do filtro inverso por uma aproximação do filtro de Wiener.

Na área de Radioastronomia, estão sendo utilizados métodos de regressão estatística para lidar com imagens de pequena dimensionalidade. O lobo principal da antena é aproximado por uma função gaussiana, o que permite adotar também a hipótese de separabilidade. O mau condicionamento da deconvolução está sendo tratado por métodos de suavização.

Na coordenadoria de Sistemas de Processamento de Imagens estão em desenvolvimento os seguintes projetos:

a) Sistema de Tratamento de Imagens Digitais (SITIM)

Tal projeto refere-se, na realidade, a uma família de sistemas de processamento de imagens que vem sendo desenvolvido a partir de 1984. O primeiro elemento da família (SITIM-110) é constituído basicamente por um microcomputador nacional de 16 bits compatível com o IBM PC/XT. O sistema dispõe também de uma unidade de armazenamento e visualização de imagens, desenvolvido pelo INPE, com posto de 4 planos de 512 x 512 "pixels" (8 bits/"pixel"). O conjunto de programa disponível pode ser dividido em dois grandes grupos: 1) sistema operacional do microcomputador (do tipo UNIX, que permite operação multiusuário e multitarefa) e seus utilitários; 2) funções aplicativos desenvolvidas em linguagem "C", que constitui um pacote voltado para a área de Sensoriamento Remoto. É incluído também um conjunto de rotinas básicas que oferece a possibilidade de criação de novas funções. Os programas aplicativos do sistema são de fácil interação como usuário através de um cardápio que inclui funções como: 1) transferência de imagens (do disco ou da fita magnética para a tela, impressão de imagens); 2) tratamento de imagens (tabela de realce, filtragem espacial passa-baixas ou passa-altas por convolução espacial, razão entre bandas espectrais, detecção de bordas, eliminação de ruído); 3) classificação de imagens (pelo método do paralelepípedo, por máxima verossimilhança, por fatiamento (realce a pseudocor) e homogeneização das áreas classificadas); 4) operações no visualizador (utilitários que envolvem seleção de bandas espectrais, colocação de legendas, padrão de calibração, geração de cores, apagamento da imagem e leitura do valor de um "pixel" e sua vizinhança); 5) registro de imagens (por técnicas translacionais e por pontos de controle); 6) rotação espectral (pela transformada de Karhunen-Loève e por análise canônica); 7) classificação por máxima verossimilhança e por distância euclidiana (incluindo as fases de treinamento, seleção de atributos e de classificação propriamente dita). A Figura 2 mostra o resultado da classificação da região de São José dos Campos pelo método de máxima verossimilhança efetuado pelo SITIM-110.

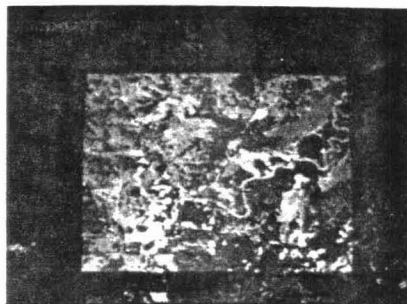


Fig. 2: Classificação por máxima verossimilhança no SITIM-110.

O segundo membro da família (SITIM-150, já desenvolvido) é baseado no mesmo microcomputador e possui uma nova unidade visualizadora, também desenvolvida no INPE, composta de 4 planos de 1024 linhas x 1024 "pixels" (com opção de 4 ou 8 bits/"pixel"), o que permite capacidade de zoom sobre a imagem por uma janela de 512 x 512, "zoom" por "hardware" (com fatores de 1 a 16), geração de tabelas de cores e aquisição de imagens por uma câmera de TV. Opcionalmente, está em desenvolvimento um módulo de processamento rápido, tendo como núcleo um processador rápido de sinais baseado na tecnologia VLSI.

O terceiro membro, SITIM-200, está previsto com uma configuração baseado num microcomputador nacional de 16 bits mais avançado, oferecendo maior velocidade, maior capacidade de memória principal e secundária, bem como uma nova unidade de visualização de imagens baseada num controlador gráfico de última geração, além do processador especial.

O quarto membro, SITIM-300, será baseado no mesmo microcomputador e na mesma unidade visualizadora que o SITIM-200 e oferecerá um módulo especial de processamento paralelo com uma arquitetura sistólica na forma de uma matriz de processadores de tecnologia VLSI, onde cada processador é dedicado a um "pixel" da imagem.

b) Sistema Geográfico de Informações

Tal projeto, desenvolvido no ambiente SITIM, permite adquirir, armazenar, combinar e recuperar informações codificadas de maneira espacial. Tais dados podem provir de várias fontes, como mapas temáticos ou topográficos, dados de censos e imagens de satélites classificadas ou não.

O sistema oferece uma ampla variedade de aplicações tanto ao nível municipal como planejamento urbano, pesquisa sociológica, etc., como ao nível regional ou nacional, em áreas como Cartografia Topográfica, Geologia, Agricultura, etc.

Devido à utilização de imagens de satélites como um dos possíveis planos de informação, optou-se por armazenar os dados na forma de varredura. Tal tipo de armazenamento pode exigir o uso de algoritmos de conversão de estrutura de dados na forma vetorial para varredura, ou vice-versa, nas operações de entrada e saída com periféricos como digitalizadoras ou plotadoras.

O sistema é composto basicamente de três módulos: entrada, manipulação e saída de dados. O módulo de entrada de dados compreende, entre outras funções, as de digitalização de mapas temáticos, incluindo edição dos dados obtidos (como ajuste de pontos, supressão de linhas e de centróides de áreas) e as transformações geométricas para compatibilizar imagens de satélites a uma referência cartográfica; a digitalização de mapas topográficos que compreendem, além de operações análogas às anteriores, funções como traçado de linhas e geração de dados em grades regulares por interpolação dos valores amostrados.

O módulo de manipulação dos dados inclui operações com superposição de mapas (envolvendo gerações lógicas entre dois planos de informação), cálculo das áreas de polígonos destes planos, bem como reclassificação de tais polígonos.

O módulo de saída permite, por exemplo, a visualização de dados espaciais em duas dimensões, o preenchimento dos polígonos com uma determinada cor, a modificação deste atributo, assim como a plotagem em três dimensões de superfícies que representam grandes físicas, como modelos digitais de terreno. Para assegurar a portabilidade dos programas do módulo de saída, é utilizado um pacote de funções gráficas básicas, baseado no padrão GKS (Graphical Kernel System) nas operações em duas dimensões.

A Figura 3 ilustra uma saída gráfica do sistema geográfico de informações, evidenciando as operações lógicas entre planos de informação, pela combinação lógica das áreas cultivadas com soja e trigo no Estado do Paraná.

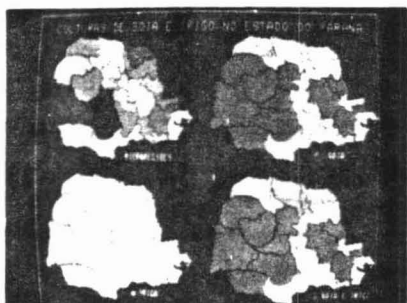


Fig. 3: Exemplo de saída gráfica do Sistema Geográfico de Informações.

III - BIBLIOGRAFIA

BERNSTEIN, R. ed. Digital image processing for remote sensing. New York, NY, IEEE Press, 1978.

COMPUTER VISION, GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, New York, Academic, 1972-bim.

EKSTROM, M.P. Digital image processing techniques. Academic, 1984

FU, K.S.; ROSENFELD, A. Pattern recognition and image processing. IEEE Transactions on Computers, C-25(12): 1336-1346, Dec. 1976.

GONZALEZ, R.C.; WINTZ, P. Digital Image Processing. Reading, MA., Addison Wesley 1977.

HALL, E.L. Computer image processing and recognition. New York, NY, Academic, 1979.

IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. New York, NY, IEEE Computer Society, 1979, bim.

MONMONIER, M.S. Computer Assisted Cartography - Principles and Prospects, Prentice-Hall, 1982.

PATTERN RECOGNITION. Oxford, Pergamon, 1968-bim.

PRATT, W.K. Digital image processing. New York, NY, John Wiley, 1978.

ROSENFELD, A. Image processing and recognition. In: YOVITZ, M.C. Advances in computers. New York, NY, Academic, 1979. V. 18, Cap. 1, p. 1-57.

ROSENFELD, A.; KAK, A.C. Digital picture processing, 2ª edi., New York, NY, Academic, 1982.