

## **10. CORREÇÃO GEOMÉTRICA E REGISTRO DE IMAGENS**

## 10.1 Introdução

Imagens geradas por sensores remotos, sejam elas fotografias aéreas ou imagens de satélite, são sujeitas a uma série de distorções espaciais, não possuindo portanto precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados. Todavia, a informação extraída de imagens de sensoriamento remoto necessita muitas vezes ser integrada com outros tipos de informação, representados na forma de mapas. Esse tipo de uso é muito comum quando se trabalha com Sistemas Geográficos Informação (SGIs), nos quais as imagens de sensoriamento remoto são uma das principais fontes de dados. Outras vezes, os dados contidos em uma imagem de satélite precisam ser apresentados ao usuário na forma de um "mapa", com um grid geográfico de referência lançado sobre a mesma.

Um mapa pode ser definido como: "**... uma representação gráfica, em uma superfície plana, da superfície da Terra, ou parte dela, mostrando suas feições geográficas e superficiais. Estas são posicionadas de acordo com controles geodéticos, grids, projeções e escalas previamente definidos**". Uma projeção cartográfica é uma maneira de se representar a superfície curva da Terra sobre uma folha plana de papel (o mapa). Muitos e diferentes tipos de projeções cartográficas são utilizados para tal. Cada um desses tipos representa uma tentativa de preservar alguma propriedade da área mapeada, como a representação uniforme de áreas, formas ou distâncias. Apenas uma dessas propriedades pode ser corretamente representada em um mesmo tipo de projeção, ao passo que as outras duas podem no máximo ter suas distorções minimizadas. No Brasil, o sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator) é utilizado como padrão para mapas, sendo que nele as distâncias são corretamente representadas.

Para que a precisão cartográfica seja introduzida em imagens de sensoriamento remoto, faz-se necessário que essas imagens digitais sejam corrigidas, segundo algum sistema de coordenadas. A transformação de uma imagem de modo que ela assuma as propriedades de escala e de projeção de um mapa é chamada de **correção geométrica**. Esse tipo de correção pode ser executado em um sistema de processamento digital de imagens.

Muitas vezes existe a necessidade de se combinar duas imagens diferentes de uma mesma área. Esse é o caso, por exemplo, de imagens multi-temporais de satélite, no qual se deseja comparar mudanças ocorridas em uma determinada área, em diferentes épocas. Uma vez que a plataforma (satélite) que carrega o sensor é afetada por movimentos aleatórios, duas imagens obtidas em diferentes épocas jamais terão uma cobertura equivalente no terreno, ainda que o sensor e o satélite sejam os mesmos. Para que duas imagens seja perfeitamente coincidentes no espaço é necessário que sofram um tipo de transformação espacial conhecido

por **registro**. O registro é então o ajuste do sistema de coordenadas de uma imagem (dado em pixels/linhas) ao sistema equivalente de uma outra imagem, cobrindo a mesma área. Outro exemplo comum de necessidade do registro é na integração de imagens de diferentes sensores (SPOT e TM, por exemplo) sobre uma mesma área. Um outro tipo de exemplo no qual o registro entre imagens é usado é o da confecção de mosaicos a partir de imagens vizinhas com cobertura parcial.

A correção geométrica e o registro entre imagens de sensoriamento remoto serão tratados neste capítulo.

## 10.2 Fontes de distorção em imagens orbitais

Para melhor entender essa questão da distorção, faz-se necessário um exame das fontes de distorção em imagens obtidas por sensores remotos orbitais. Dentre as fontes cujas distorções são passíveis de correção, chamadas distorções não-sistemáticas, as principais são: rotação da Terra e instabilidade da plataforma. A instabilidade da plataforma pode ser separada em 5 componentes, que atuam em conjunto e de maneira não-uniforme, produzindo distorções. Essas componentes são: variação na altitude, na velocidade e nos três eixos de rotação do satélite, conhecidos por "*roll*", "*pitch*" e "*yaw*". A figura 10.1 mostra o efeito desses seis tipos de distorções em uma imagem de satélite.

O processo de correção geométrica envolve as seguintes etapas:

- i ) determinação da relação entre o sistema de coordenadas do mapa e da imagem;
- ii ) estabelecimento de um conjunto de pontos definindo os centros dos pixels na imagem corrigida, conjunto esse definindo um grid com as propriedades cartográficas do mapa;
- iii) cálculo dos valores de intensidade dos pixels na imagem corrigida, por interpolação das intensidades dos pixels da imagem original.

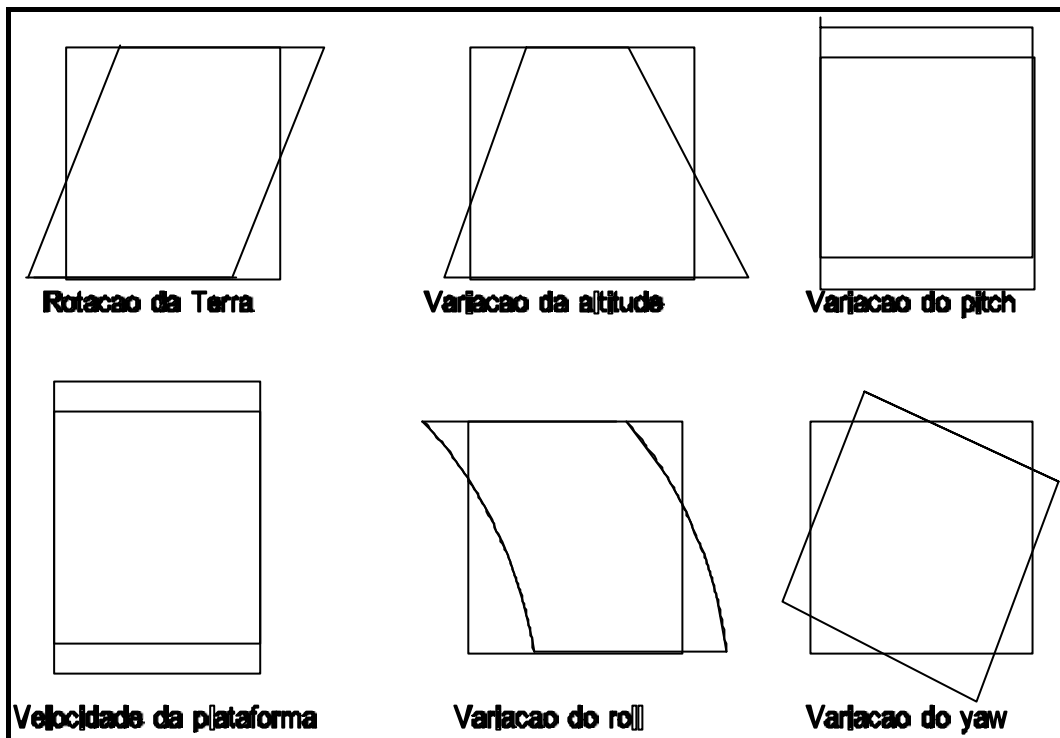


Figura 10.1 - Efeito das distorções não-sistemáticas em imagens orbitais. Linhas cheias indicam as imagens distorcidas e linhas tracejadas as mesmas imagens restauradas. (Modif. de Schowengerdt, 1983)

### 10.3 Correção geométrica

A relação entre os dois sistemas de coordenadas (mapa e imagem) pode ser calculada de duas formas. A primeira delas é através do **conhecimento exato dos parâmetros geométricos da órbita do satélite e de outras variáveis**, também chamada de **modelo de geometria orbital**. A segunda forma de se calcular a relação entre os dois sistemas de coordenadas, e também a mais utilizada, é através da **definição de pontos de controle no terreno**, que tem de ser reconhecíveis tanto no mapa como na imagem.

Como será visto a seguir, esses dois tipos de correção geométrica são usados de forma complementar, no ajuste de imagens orbitais.

#### 10.3.1 Transformação baseada no modelo de geometria orbital

A transformação relativa ao modelo de geometria orbital se baseia no conhecimento das características da órbita do satélite, da rotação da Terra e no fator de amostragem do sensor. O grau de precisão dessa técnica é relativamente baixo, sendo o erro médio estimado para esse método da ordem de 2%.

Os tipos de distorção eliminados por essa transformação são mudanças de escala, correção do "skew" (o ângulo de inclinação entre a projeção da órbita em relação ao eixo norte-sul da Terra) e correção do efeito de rotação da Terra durante a aquisição da imagem (a título de exemplo, o deslocamento relativo entre a primeira e a última linha de uma imagem MSS em uma latitude de 50° é mais de 8 km!).

A transformação para correção dessas distorções é efetuada nas fitas-mestre, antes da gravação das fitas CCTs para distribuição aos usuários. No Brasil, o INPE executa esse tipo de correção rotineiramente em todos os seus produtos, não havendo portanto necessidade de se fazê-lo posteriormente.

As informações sobre os parâmetros orbitais do sensor são fornecidas nas fitas CCTs, contidas geralmente em um arquivo específico, situado antes da imagem.

### **10.3.2 Transformação baseada em pontos de controle no terreno**

Uma vez que a precisão fornecida pela transformação baseada no modelo de geometria orbital é reduzida, existe muitas vezes a necessidade de refinar a correção geométrica de uma imagem. Nestes casos, usa-se a transformação baseada em pontos de controle no terreno, que permite uma precisão bem mais elevada. É claro que essa maior precisão será uma função direta da precisão na identificação e posicionamento dos pontos de controle, o que é feito geralmente de forma interativa pelo usuário.

A primeira condição para se aplicar essa transformação é a existência de mapa planimétrico ou plani-altimétrico confiável e em uma escala adequada na área em questão, visto que os pontos de controle (GCPs, de "*ground control points*") terão que ser precisamente identificados em ambos, imagem e mapa. Em áreas onde não existem mapas, a alternativa é medir precisamente no terreno a posição geográfica de alguns pontos identificáveis nas imagens, usando por exemplo GPS's (*Global Positioning Systems*), o que por outro lado representa um custo elevado.

O conceito por trás desse método é o de estabelecer as diferenças de posicionamento de alguns pontos na imagem e no mapa. A partir dessas diferenças, a natureza da distorção presente na imagem pode ser estimada e uma transformação adequada pode ser computada, no sentido de corrigir a imagem.

Os GCPs são feições bem definidas, geralmente de grande contraste espectral em relação aos seus arredores na imagem e facilmente reconhecíveis, que podem ser precisamente localizados tanto no mapa quanto na imagem. Exemplos de tipos de GCPs mais comuns são intersecção de estradas, limites de feições agrícolas (campos semeados), intersecção de drenagem, pistas de aeroportos e outros. Esses GCPs são identificados e posicionados de maneira

interativa na imagem, na forma de coordenadas em linha e coluna, usando-se um sistema de processamento de imagem (geralmente com alguma função de "zoom" para maior precisão). As coordenadas geográficas dos mesmos GCPs são obtidas a partir dos mapas (com o uso de mesa digitalizadora ou, quando estas não forem disponíveis, com uma simples régua), ou do uso de GPS, e fornecidas ao sistema de processamento de imagens.

O procedimento usualmente adotado envolve a identificação de, no mínimo, de 6 a 10 pontos de controle em uma imagem de 1.000 x 1.000 pixels (para imagens maiores o número de pontos deve também ser maior) e no mapa correspondente. A transformação de coordenadas é então modelada usando-se um único polinômio linear de baixa ordem (geralmente de 1ª ordem), obtido através de um ajuste pelo método dos mínimos quadrados em relação aos GCPs (Figura 10.2). Essa transformação é chamada de **transformação afim** e irá corrigir quaisquer distorções de escala, deslocamento, rotação ou "skew" existente entre a imagem e o mapa.

Idealmente, o programa a ser usado para o cálculo dessa transformação afim deve oferecer a opção de, antes de ser aplicada a transformação, comparar os erros obtidos nos ajustes entre os GCPs e os seus equivalentes na imagem e, caso algum deles apresente individualmente um erro considerado alto, descartá-lo. A margem de erro recomendável é por volta de  $\pm 1$  pixel. Após uma análise dos erros para cada GCP individualmente, aplica-se a transformação na imagem original, produzindo-se então uma nova imagem, corrigida segundo a projeção cartográfica do mapa a partir do qual foram obtidos os GCPs. Para se obter essa nova imagem, é usado o processo de reamostragem por interpolação, exposto a seguir.

#### 10.4 Reamostragem por interpolação

O processo de corrigir as distorções de uma imagem através de GCPs resulta na produção de uma nova imagem. Os pixels dessa nova imagem, por força do processo de correção, não correspondem espacialmente aos pixels da imagem original, o que implica em um problema: qual o DN a ser atribuído a esses novos pixels? A Figura 10.3 ilustra graficamente essa questão.

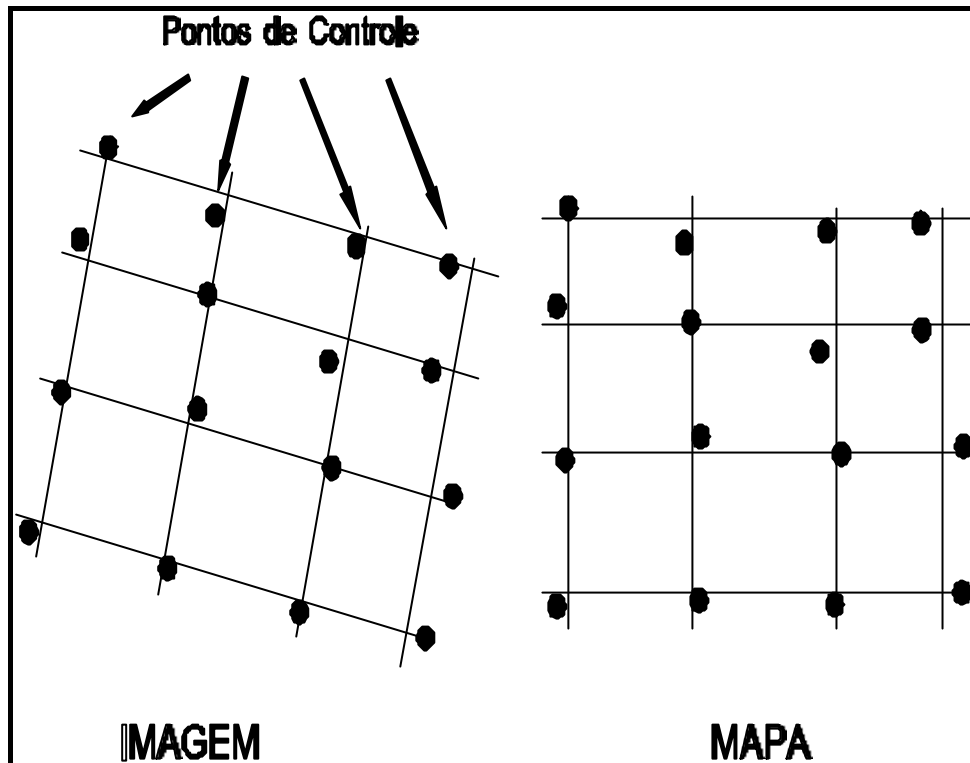
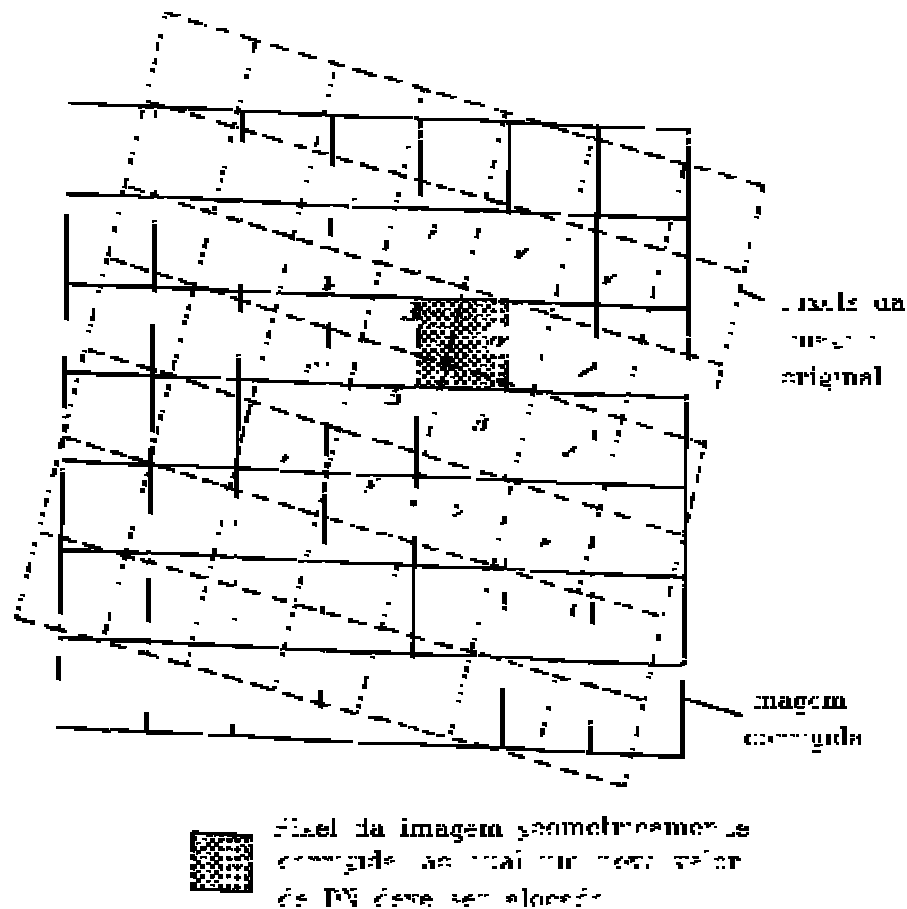


Figura 10.2 - Modelo de distorção usando pontos de controle no terreno. Este exemplo representa uma aproximação usando o método dos mínimos quadrados e um polinômio linear.

Para se determinar o valor dos pixels do grid corrigido, utiliza-se o método de **interpolação de valores de DNs**. A nova imagem é então reamostrada inteiramente, sendo o valor de DN de cada um de seus pixels determinado com base na interpolação dos valores de DN dos pixels mais próximos da imagem original. Existem vários métodos de interpolação, com diferentes precisões. Os métodos mais comuns são: **vizinho próximo**, **bilinear** e **convolução cúbica**.

Pelo **método do vizinho próximo**, o novo valor do pixel hachuriado da Figura 10.3 seria igual a  $\alpha$ , uma vez que este é o valor mais próximo de seu centro. Este é o método mais simples dos três, tendo uma vantagem, a rapidez de computação, e uma desvantagem, o fato de que valores de DNs se repetem, formando uma imagem visualmente com pouca estética.



**Figura 10.3** - O grid de linhas tracejadas acima representa uma imagem original com distorções, a ser corrigida segundo um novo grid geometricamente preciso, representado em linhas cheias. Os símbolos **a**, **b** e **g** representam valores de DN's da imagem original. O novo valor de DN do pixel hachurado será definido com base na interpolação dos valores dos pixel mais próximos da imagem original. (Modif. de Curran, 1986).

**O método de interpolação bilinear** toma por base os valores de DN's dos quatro vizinhos mais próximos ao centro do novo pixel, calculando uma média ponderada pelas distâncias dos centros desses quatro vizinhos ao centro do novo pixel. Na Figura 10.3, os valores  $\alpha$  e  $\beta$  seriam considerados no cálculo. Por trabalhar com uma média, as imagens produzidas por este método são mais suavizadas do que o anterior. Por outro lado, feições de bordas da imagem original podem ser também suavizadas, perdendo contraste. O tempo de computação deste método é mais elevado do que o anterior.

O terceiro método é conhecido por **convolução cúbica** e baseia-se no ajuste de uma superfície polinomial de terceiro grau (bidimensional) à região circundando o pixel em questão. Neste caso, os 16 vizinhos mais próximos seriam usados para determinar o valor do pixel hachurado na Figura 10.3 ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\tau$ ). Esta



técnica é consideravelmente mais complicada do que as anteriores, mas tende a produzir imagens com uma aparência bem mais "natural", embora alguma perda de feições de alta frequência acabe por ocorrer, uma vez que qualquer interpolador é na verdade um filtro passa baixas.

A Tabela X.1 abaixo compara as características dos três métodos na interpolação do pixel hachuriado da Figura 10.3

A escolha de qual dos métodos usar vai depender basicamente de dois fatores: qual o uso a ser dado à imagem corrigida e quais as facilidades de computação disponíveis, visto que esse processo é extremamente demorado. Embora a aparência estética do método do vizinho próximo não seja a melhor, esse é o método que mais "preserva" o valor original do DN, uma vez que não envolve nenhuma média. Por isso, se a imagem vai ser submetida à uma classificação, certamente não é desejável que se modifique muito o valor dos DNs. Se, por outro lado, o propósito é a produção de uma imagem esteticamente agradável para, por exemplo, superpor a uma base cartográfica para comparação, o melhor é usar o método de convolução cúbica.

Método	Técnica	Pixels envolvidos no cálculo'	Tempo relativo de com-putação	Vantagens	Desvantagens
Vizinho próximo	Transfere o DN do vizinho mais próximo	$\alpha$	1	Simples de computar; preserva o DN original	Imagem pouco estética
Interpolação bi-linear	Calcula a média ponderada dos 4 vizinhos	$\alpha$ e $\beta$	10	Imagem suave; geometricamente correta	Altera o DN do pixels original
Convolução cúbica	Utiliza uma média usando os 16 vizinhos próximos	$\alpha$ , $\beta$ e $\gamma$	20	Imagem esteticamente melhor	Complexa de calcular

\* Ver figura 10.3

Tabela X.1 - **Comparação entre os três métodos de reamostragem por interpolação. (Modif. de Curran, 1986).**

## 10.4 Registro de imagens

Em sensoriamento remoto, muitas vezes a análise comparativa de imagens multi-temporais, ou a combinação entre imagens de diferentes sensores sobre uma mesma área, ou ainda a justaposição de imagens se faz necessária. Nestes casos, é preciso assegurar que os pixels das imagens a serem trabalhadas sejam referentes às mesmas área no terreno. Mesmo considerando um mesmo sensor, a

bordo de um mesmo satélite, dificilmente essa coincidência nos pixels ocorrerá, devido às distorções não sistemáticas causadas pelos movimentos do satélite. Portanto, antes de se combinar/comparar duas imagens de uma mesma área, é necessário que ambas estejam perfeitamente **registradas entre si**.

Existem duas maneiras de registrar imagens: o **modo automático** e o **modo manual**. O modo automático baseia-se na análise da similaridade ou dissimilaridade entre duas imagens, que é calculada com base no deslocamento relativo existente entre as mesmas. A maneira como a similaridade é determinada baseia-se na **correlação** entre a mesma área nas duas imagens pois, quanto maior for a correlação, mais similares serão as áreas (duas áreas idênticas terão 100% de correlação). Esse processo é feito através de "janelas", de maneira análoga à filtragem por convolução. Através dessa análise é possível então identificar feições correspondente no terreno mostradas nas duas imagens e, subsequentemente, registrá-las conforme a disposição espacial dessas feições. Este é um método de alta precisão mas bastante demorado e que requer tanto *softwares* sofisticado quanto grande capacidade de computação.

O registro manual se baseia na identificação de pontos de controle no terreno, de forma semelhante à vista na correção geométrica usando GCPs, sendo indicado para os casos em que uma grande precisão não é necessária. Neste caso, porém, ao invés de registrar as coordenadas em pixel/linha de uma imagem às coordenadas geográficas de um mapa, vai-se registrar duas coordenadas tipo pixel/linha entre si. As etapas subsequentes (transformação afim, reamostragem por interpolação) são realizadas exatamente da mesma forma já vista.

## REFERÊNCIAS

As referencias que se seguem serviram de fonte de consulta para a preparação deste livro e são recomendadas como leitura complementar.

- CANAS, A. C. **Geosciences Image Processing**. London. Imperial College, 1987. 136 p.
- CHAVEZ Jr., P., Bauer, B. An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, n.1, p.23-38, Fevereiro. 1982
- CRIPPEN, R. E. The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 767-776, Abril. 1988.
- CRÓSTA, A. P. Discriminação de principais componentes com base em relações quantitativas e espectrais. In: IV SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 1990, Rio Claro. **Boletim de Resumos ...**, Rio Claro, IGCE-UNESP, 1990.
- DRURY, S.A. **Image Interpretation in Geology**. London. Allen & Unwin, 1987. 243 p.
- DRURY, S.A., **Remote Sensing Course Book**. Open Universiteit. Heerlen, 1989. 383 p.
- GILLESPIE, A.R., KAHLE, A.B., WALKER, R.E. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches. **Remote Sensing of Environment**, v. 20, n. 3, p. 209-235, Dezembro. 1986.
- GONZALEZ, R.C. & WINTZ, P. **Digital Image Processing** (2nd Ed). Addison-Wesley Pub. Co. Reading, MA, 1987. 503 p.
- GUO, L.J. Balance contrast enhancement technique and its application in image colour composition. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 12, n. 10, p. 2133-2151, Agosto. 1991.
- LOUGHLIN, W. Principal component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda (MA)v.57, n. 9, p. 1163-1169, Setembro. 1991.
- MASCARENHAS, N.D.A. & VELASCO, F.R.D. **Processamento Digital de Imagens**. 4ª Escola Computação/IME-USP. São Paulo, 1984. 235 p.
- MASUOKA, P.M., HARRIS, J., LOWMAM JR., P.D., BLODGET, H.W. 1988, Digital processing of orbital radar to enhance geologic structure: examples from the Canadian Shield. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n. 5, p. 621-632, Junho, 1988.
- MATHER, P.M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. John Wiley & Sons. Chichester, 1987. 352 p.

- MOIK, J.G. **Digital Processing of Remotely Sensed Images**. NASA Public. SP-431, Goddard Space Flight Center, 1980. 330 p.
- NIBLACK, W. **An Introduction to Digital Image Processing**. Prentice/Hall International. London, 1987. 215 p.
- ROTHERY, D.A. 1987, Decorrelation stretching and related techniques as an aid to image interpretation in geology. In: ANNUAL CONFERENCE, 13th., 1987, Nottingham. **Proceedings**, Nottingham, The Remote Sensing Society, 1987, p. 194-203.
- SABINS, F. **Remote Sensing: Principles and Interpretation**. W.H. Freeman & Co. New York, 1987. 449 p.
- SCHOWENGERDT, R.A **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press. New York, 1983. 249 p.
- WAHL, F.M. **Digital Image Signal Processing**. Artech House. Norwood, MA, 1987. 183 p.