



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5546-TDI/532

TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA APLICAÇÕES
NO MAPEAMENTO POR CARTA-IMAGEM

Marcos Antônio Timbó Elmiro

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Luiz Alberto Vieira Dias,
aprovada em fevereiro de 1994

INPE
São José dos Campos
Março de 1994

621.376.5

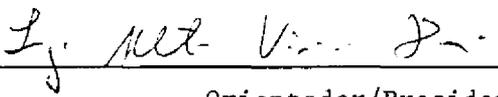
ELMIRO, M.A.T.

Técnicas de processamento digital de
imagens para aplicações no mapeamento por
carta-imagem. / Marcos Antonio Timbó Elmiro.
-- São José dos Campos: INPE, 1994. 130p. --
(INPE-5546-TDI/532)

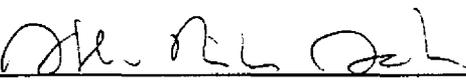
1. Processamento digital de imagens. 2.
Mosaicos digitais. 3. Carta-imagem. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Luiz Alberto Vieira Dias


Orientador/Presidente

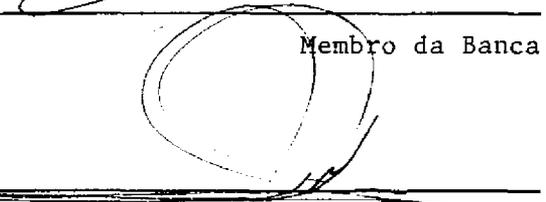
Dr. Athos Ribeiro dos Santos


Membro da Banca

Dr. Gerald Jean Francis Banon


Membro da Banca

Dr. Nehemias Lima Lacerda


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Marcos Antônio Timbó Elmiro

São José dos Campos, 25 de fevereiro de 1994

**À minha esposa,
Rosângela, e aos meus
filhos, Gustavo e Nathália
dedico esta obra.**

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor Luiz Aberto Vieira Dias pela orientação, sugestões críticas, incentivos e sobretudo pela confiança.

Ao Instituto de Cartografia Aeronáutica pela indicação para realizar este curso.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelos conhecimentos proporcionados.

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço pelo apoio prestado no uso dos equipamentos de processamento de imagens.

Aos Professores do Curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Muitas atividades fundamentais para o país, notadamente aquelas ligadas ao levantamento de recursos naturais, utilizam-se dos mapas sistemáticos nacionais como uma base confiável para assentar seus resultados. Em vista do mapeamento tradicional constituir-se numa atividade demorada e de alto custo, a cobertura cartográfica básica do país está, ainda, muito aquém do desejável. O mapeamento através de Carta-Imagem pode constituir-se numa solução alternativa, dinâmica e de baixo custo para evitar a dependência dos mapas tradicionais. Este trabalho apresenta as linhas básicas de uma metodologia para produzir Carta-Imagem, utilizando uma abordagem inteiramente digital. Dentro desta abordagem metodológica, três passos principais são analisados a fundo, seguidos do desenvolvimento de algoritmos e da implementação em programas computacionais. O primeiro passo é a mosaicagem digital, utilizando o ajuste da tonalidade das imagens vizinhas e uma linha irregular para junção. O segundo passo é a remoção da cobertura de nuvens por substituição de dados multitemporais. E o passo final é a aplicação de técnicas especiais de realce para feições localizadas. Os resultados obtidos mostraram os seguintes pontos: (1) a mosaicagem digital pode produzir grandes imagens como resultado de imagens menores, onde é imperceptível diferenciar as imagens fontes; (2) a estética das imagens pode ser significativamente melhorada através de técnicas simples para remoção de nuvens, baseadas em dados multitemporais; e (3) técnicas especiais de realce melhoram a qualidade visual e o potencial de interpretação. Estes resultados permitiram concluir que o atual processo de mapeamento por Carta-Imagem pode ser significativamente melhorado, utilizando métodos de processamento inteiramente digitais.

DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES FOR IMAGE-MAPPING APPLICATIONS

ABSTRACT

Many important activities, specially those related to survey of natural resources are supported by national systematic maps in order to provide a confident base to place the results. Unfortunately, because traditional mapping is a very expensive and slow task, the basic national cartographic coverage is poorly established. Image-Mapping techniques can provide a fast and cost-effective alternative solution to avoid dependency on traditional maps. This paper presents the basic guidelines for a methodology to produce Image-Maps using an entirely digital approach. Within this methodology three main steps are deeply discussed, followed by algorithm developments and computer program implementations. The first step is digital mosaicking using a gray level adjustment of image tiles and an irregular join line for connecting them. The second step is a removal of cloud coverage by multitemporal data replacement. And the final step is application of special image enhancement techniques for local feature improvement. The results pointed out that digital mosaicking can produce resulting image with no visible differences between source images; image coverage can be significantly improved by cloud removal based on multitemporal data; and special purpose enhancement techniques improve the image visual quality, aiding the interpretation task. From that results it was possible to draw some conclusions indicating that Image-Mapping activities can be significantly improved by using digital approaches as proposed by this work.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE ABREVIATURAS	xxi
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Apresentação.....	1
1.2 - Objetivos.....	2
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	5
2.1 - A necessidade das imagens de satélites no mapeamento nacional.....	5
2.2 - Estudos e pesquisas anteriores	7
2.3 - Pré-processamento das imagens TM-Landsat-5.....	9
2.4 - Sistema de projeção cartográfica.....	10
2.4.1 - Projeções perspectivas.....	11
2.4.2 - Projeção das imagens orbitais	12
2.4.3 - A projeção SOM	13
2.4.4 - A projeção UTM	13
2.4.5 - A projeção Cônica Conforme de Lambert	15
2.5 - Seleção das melhores bandas	15
2.6 - Correção e avaliação da precisão geométrica	17
2.6.1 - Técnicas de correção geométrica	17
2.6.2 - Transformações polinomiais.....	18
2.6.3 - Reamostragem das imagens	20
2.6.4 - Interpolação	20
2.6.5 - Determinação dos pontos de controle	23
2.6.6 - Precisão das imagens TM-Landsat-5	23
2.7 - Remoção de nuvens.....	24
2.8 - Mosaicagem	25
2.8.1 - Mosaicos analógicos.....	26
2.8.2 - Mosaicos digitais	27

2.8.3 - Montagem de pequenos mosaicos digitais	28
2.8.4 - Grandes mosaicos digitais	29
2.9 - Realce radiométrico das imagens	31
2.10 - Realces especiais.....	31
2.11 - Preparo e reprodução cartográfica	34
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</u>	35
3.1 - Planejamento da folha	37
3.2 - Seleção de imagens.....	37
3.3 - Pré-processamento digital das imagens	39
3.4 - Seleção de bandas.....	39
3.5 - Extração de dados	40
3.6 - Mosaicagem digital das imagens	40
3.6.1 - Transformação geométrica das imagens	40
3.6.2 - Seleção de pontos de controle.....	41
3.6.3 - Cálculo dos coeficientes de transformação	43
3.6.4 - Reamostragem das imagens	45
3.6.5 - Montagem do mosaico sem correção	46
3.6.6 - Mosaico com correção.....	47
3.6.7 - Avaliação da precisão do mosaico.....	51
3.7 - Remoção de nuvens.....	52
3.8 - Realce radiométrico.....	53
3.9 - Realces especiais	53
3.10 - Corte preciso do limite útil.....	55
3.11 - Separação de cores.....	55
3.12 - Projeto de lay-out da carta.....	56
3.13 - Sobreposição de textos e símbolos gráficos.....	56
3.14 - Preparo das chapas de impressão	56
<u>CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	57
4.1 - Análise dos mosaicos digitais	57
4.2 - Resultados alcançados na remoção de nuvens	69
4.3 - Resultados na aplicação de realces especiais.....	72
4.3.1 - Atribuição de cor.....	72

4.3.2 - Filtragem seletiva.....	75
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u>	77
<u>CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A - LISTAGEM DOS PROGRAMAS EM LINGUAGEM C	87

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Esquema ilustrativo das projeções mais utilizadas nas imagens Landsat.....	14
2.2 - Reamostragem e métodos de interpolação utilizados em sensoriamento remoto.....	22
2.3 - Esquema ilustrativo dos processos de separação, mascaramento, substituição e atribuição de cor.....	33
3.1 - Diagrama de blocos das etapas de construção de uma Carta-Imagem utilizando métodos digitais.....	36
3.2 - Esquema da disposição das imagens selecionadas, mostrando a área de trabalho em destaque.....	38
3.3 - Deslocamentos devido ao relevo.....	43
3.4 - Diagrama representativo das imagens de entrada e saída do módulo de reamostragem.....	46
3.5 - Porção esquerda (a): mosaico sem correção, porção direita (b): mosaico com correção.....	50
4.1 - Subimagem da banda TM4 quadrante B, componente esquerda do mosaico.....	60
4.2 - Subimagem da banda TM4 quadrante A, componente direita do mosaico...	60
4.3 - Subimagem da figura 4.1 reamostrada (componente esquerda do mosaico).....	61
4.4 - Subimagem da Figura 4.2 reamostrada (componente direita do mosaico)...	62
4.5 - Mosaico da banda TM4, sem correção.....	63
4.6 - Mosaico da banda TM4, com correção apresentando bordas horizontais....	64
4.7 - Detalhe ampliado do mosaico da Figura 4.6 na área de junção..	64
4.8 - Mosaico da banda TM4 com correção apresentando ótimos resultados..	65
4.9 - Detalhe ampliado do mosaico da Figura 4.8 na área de junção..	67
4.10 - Composição colorida RGB de três bandas (5,4,3) do mosaico.....	67
4.11 - Composição colorida RGB, com as três bandas do mosaico submetidas a um filtro passa-alta.....	68
4.12 - Máscara utilizada na filtragem das bandas do mosaico.....	68
4.13 - Imagem da banda TM3 com presença de nuvens.....	70
4.14 - Imagem da banda TM3, com nuvens em áreas diferentes da anterior.....	70
4.15 - Imagem da banda TM3 corrigida da presença de nuvens.....	71

4.16 - Composição colorida (RGB 5,4,3) das imagens com nuvens..	71
4.17 - Composição colorida (RGB 5,4,3) das imagens corrigidas da presença de nuvens	72
4.18 - Banda TM3, sem limites bem definidos entre terra firme e massas de água.	73
4.19 - Banda TM3, com limites bem definidos entre terra firme e massas de água.	74
4.20 - Composição colorida RGB, bandas 5, 4, 3, com atribuição de cor para a água.....	74
4.21 - Banda TM3, com aplicação de um filtro passa-alta não seletivo..	75
4.22 - Banda TM3, com aplicação de um filtro passa-alta seletivo..	76

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Situação do mapeamento sistemático nacional	6
3.1 - Imagens selecionadas para aplicação dos conceitos propostos neste trabalho	38
4.1 - Pontos utilizados para o cálculo dos coeficientes na imagem esquerda do mosaico	58
4.2 - Pontos utilizados para avaliação da transformação polinomial na imagem esquerda do mosaico.....	58
4.3 - Pontos utilizados para o cálculo dos coeficientes na imagem direita do mosaico	59
4.4 - Pontos utilizados para avaliação da transformação polinomial na imagem direita do mosaico.....	59
4.5 - Pontos utilizados para cálculo dos coeficientes na avaliação do mosaico final	66
4.6 - Pontos utilizados na avaliação do mosaico final.....	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEA	- Associação Nacional das Empresas de Aerolevanteamento
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiômetro Avançado de Altíssima Resolução)
COCAR	- Comissão de Cartografia
CPRM	- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
DGI	- Divisão de Geração de Imagens do INPE
DNPM	- Departamento Nacional de Produção Mineral
DSG	- Diretoria do Serviço Geográfico do Exército
EUA	- Estados Unidos da América
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMQ	- Erro Médio Quadrático, também chamado RMSE - Root Mean Square Error)
GPS	- Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
IAE	- Instituto de Aeronáutica e Espaço
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITCF	- Instituto de Terras Cartografia e Florestas do Estado do Paraná
IVDN	- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
JPL	- Jet Propulsion Laboratory (Laboratório de Propulsão a Jato)
LAMS	- Large Area Mosaicking System (Sistema para Mosaicagem de Grandes Áreas)
LIDQA	- Landsat Investigations Data Quality Analysis (Investigações para Avaliação da Qualidade dos Dados Landsat)
MSS	- Multispectral Scanner (Varredor Multiespectral)
NASA	- National Aeronautics and Space Administration (Administração de Aeronáutica e Espaço dos EUA)
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Oceânica e Atmosférica dos EUA)
PADCT	- Plano de Dinamização da Cartografia
PC	- Pontos de Controle
PEC	- Padrão de Exatidão Cartográfica
PETROBRAS	- Petróleo Brasileiro S/A
RADAM	- Radar da Amazônia

RMSE	- Root Mean Square Error (Erro da Raiz da Média dos Quadrados dos Resíduos, também chamado EMQ - Erro Médio Quadrático)
SBC	- Sociedade Brasileira de Cartografia
SLAR	- Side Looking Airborne Radar (Radar Aerotransportado de Visada Lateral)
SOM	- Espacial Obliqua de Mercator
SPOT	- Systeme Probatoire d' Observation de la Terre (Sistema Probatório de Observação da Terra)
SUDENE	- Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TM	- Thematic Mapper (Mapeador Temático)
UERJ	- Universidade do Estado do Rio de Janeiro
USGS	- United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)
UTM	- Universal Transversa de Mercator
WRS	- World Reference System (Sistema de Referência Mundial)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO

Desde os primeiros tempos do sensoriamento remoto orbital, notadamente após o lançamento do satélite Landsat-1, em 1972, tem havido um crescente interesse no sentido de explorar o potencial e tirar cada vez mais vantagens das imagens transmitidas a partir do espaço pelos sensores orbitais.

Nas últimas décadas, o uso das imagens de satélite tem sido objeto de inúmeras pesquisas e estudos experimentais, visando a aplicações nas atividades de mapeamento topográfico e cartografia temática. Algumas destas pesquisas destacaram as vantagens de uma técnica especial para construir mapas denominada: mapeamento por Carta-Imagem. Este processo consiste na utilização de imagens orbitais, corrigidas geometricamente, realçadas radiometricamente, combinadas sob a forma de mosaicos, complementadas com informações cartográficas ou alusivas a temas específicos e impressas em forma colorida.

Diversas organizações de mapeamento e instituições científicas estrangeiras alcançaram grandes progressos na busca do desenvolvimento de tecnologia para geração de cartas empregando diretamente as imagens orbitais. Os sucessos obtidos nos trabalhos experimentais conduziram ao estabelecimento de programas sistemáticos de mapeamento por Carta-Imagem, e hoje, vários países já têm ampla cobertura cartográfica, mapeada por este processo, em diversas escalas (Barbosa e Serra, 1988; Ramey, 1992).

Nos trabalhos realizados no Brasil, apesar do empenho de algumas instituições governamentais ligadas às atividades de mapeamento e sensoriamento remoto (DSG, ICA, CPRM, INPE e outros), observa-se que o volume produzido é insuficiente, em vista das crescentes necessidades e do potencial oferecido pelas imagens de sensoriamento remoto orbital.

Além da baixa taxa de produção, alguns aspectos importantes do processo de elaboração das Cartas-Imagens ainda não alcançaram o *estado da arte*, resultando num decréscimo da qualidade final dos produtos. Os problemas mais comuns,

que têm influenciado a qualidade visual e cartográfica da Carta-Imagem, reduzindo de certa forma a sua utilidade, podem ser relacionados aos três aspectos principais a saber: uso de métodos analógicos para mosaicagem das imagens, deixando de lado as técnicas de mosaicagem digital que apresentam uma série de vantagens; eliminação de informações provocadas pela presença de nuvens que podem ser minimizadas através do uso de imagens multitemporais; negligência na utilização de técnicas de realce que podem ser empregadas para melhorar a qualidade visual, facilitar a interpretação e aumentar a utilidade do produto.

1.2 - OBJETIVOS

O presente trabalho se propõe a alcançar dois objetivos principais. O primeiro, é um objetivo geral que consiste em estabelecer de forma resumida as linhas básicas de uma metodologia para produção de Carta-Imagem com base no sensoriamento remoto orbital, utilizando processos digitais.

O detalhamento do objetivo anterior abrange vários campos do sensoriamento remoto e de outras ciências, exigindo a integração de muitos trabalhos de pesquisa. Assim, o segundo objetivo deste trabalho, e que constitui a sua parte mais substancial, se propõe a estudar com maior nível de profundidade, apenas três dos tópicos encaixados dentro do contexto da metodologia proposta no primeiro objetivo. O estudo acompanha o desenvolvimento de algoritmos e a sua implementação através de procedimentos computacionais. Os tópicos escolhidos para maior detalhamento são:

- 1) Técnicas para montagem de mosaico digital com base em imagens de órbitas vizinhas;
- 2) Estudo de processos para remoção da cobertura de nuvens utilizando imagens multitemporais.
- 3) Desenvolvimento de métodos para realces especiais aplicáveis a feições localizadas ;

Estes tópicos merecem um estudo mais aprofundado em razão de representarem grande potencial para melhoria da qualidade da Carta-Imagem e por terem

sido, até o momento, assuntos pouco favorecidos pelas pesquisas no meio científico nacional.

No intuito de atingir estes objetivos o trabalho foi estruturado de acordo com a seguinte orientação.

No Capítulo 2 enfoca-se inicialmente a extrema carência de mapas que afeta o país, apontando-se para a necessidade de uma solução alternativa. Em seguida, são apresentados os fundamentos teóricos que fornecem o suporte científico para o trabalho. Dentro destes fundamentos básicos, procura-se fazer um breve histórico acerca dos aspectos importantes de algumas pesquisas e experiências anteriores; procede-se a uma exaustiva revisão acerca dos vários campos do conhecimento relacionados com o mapeamento através de imagens orbitais e são, também, introduzidas algumas técnicas digitais de grande potencial para o aperfeiçoamento do processo de mapeamento por Carta-Imagem.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia básica para produzir Carta-Imagem, e dentro desta abordagem metodológica destacam-se os tópicos de construção de mosaicos digitais, aplicação de realces especiais e remoção da cobertura de nuvens.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os principais resultados práticos obtidos no decorrer da pesquisa, resultantes da aplicação das técnicas desenvolvidas sobre imagens de uma região selecionada para estudo.

No Capítulo 5 são inferidas as principais conclusões do estudo.

No Capítulo 6 são sugeridas algumas linhas para futuras pesquisas.

Finalmente, no Apêndice são apresentadas as listagens dos programas em linguagem C, exclusivamente desenvolvidos como parte deste estudo.

A ênfase maior deste trabalho é voltada para a utilização de dados do sensor TM-Landsat, que são mais apropriados para escalas no entorno de 1:100.000 (Lillesand e Lo 1985), entretanto, as técnicas abordadas são suficientemente genéricas e

podem ser aplicadas, eventualmente com pequenas modificações, a produtos de outros sensores e em diferentes escalas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo procura-se fazer uma breve revisão bibliográfica acerca das matérias envolvidas nesta pesquisa. Inicia-se expondo a necessidade de aplicação das imagens orbitais nas atividades de mapeamento do território nacional, seguindo-se da apresentação de um breve histórico de experiências anteriores relacionadas ao desenvolvimento da Carta-Imagem. Na sequência, são introduzidos vários tópicos, conceitos e definições julgados importantes no estudo do tratamento de imagens e na ciência do mapeamento. Estes conceitos constituem os fundamentos básicos indispensáveis para facilitar a compreensão do problema abordado no presente estudo.

2.1 - A NECESSIDADE DAS IMAGENS DE SATÉLITES NO MAPEAMENTO NACIONAL

Nos dias atuais, existe um consenso de que o desenvolvimento sistemático de um país não é possível sem informações adequadas, precisas e sinóticas acerca da natureza, quantidade e distribuição dos seus recursos naturais e das riquezas produzidas pelo homem.

Os mapas constituem a base geográfica precisa e de uso tradicional sobre a qual se assentam os levantamentos de recursos de diversas naturezas. Entretanto, a produção de mapas convencionais é uma atividade que envolve o trabalho de grandes equipes e se utiliza de complexos equipamentos. O processo de construção de um mapa passa necessariamente pelas etapas de planejamento de vôo, cobertura fotográfica, levantamento de campo, aerotriangulação, restituição fotogramétrica, confecção dos originais e impressão, resultando numa operação morosa e cara que não tem fornecido uma resposta satisfatória para a crescente demanda por mapas necessários ao planejamento e gerenciamento de recursos de diversas naturezas.

As cartas regulares do território nacional produzidas nas escalas de 1:1.000.000, 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000 constituem o que se chama de Mapeamento Sistemático Brasileiro. A produção e atualização destas cartas em caráter regular é atribuição do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG), complementada por outros

órgãos públicos ou privados que executam mapeamento em caráter menos freqüente, como a SUDENE, ICA, empresas nacionais de aerolevanteamento, etc.

As dificuldades econômicas e tecnológicas, comuns aos países em desenvolvimento, agravadas pela vasta extensão territorial e pelo acesso difícil a certas regiões, restringem a condução do mapeamento sistemático nacional a um ritmo bastante lento, resultando numa cobertura cartográfica muito aquém das necessidades, tanto em termos de área total mapeada como em termos de revisão e atualização dos mapas existentes. A Tabela 2.1 mostra, em números aproximados, a situação atual do mapeamento sistemático nacional.

TABELA 2.1 - SITUAÇÃO DO MAPEAMENTO SISTEMÁTICO NACIONAL

ESCALA	ÁREA MAPEADA		ÁREA NÃO MAPEADA		TOTAL DE FOLHAS
	N° DE FOLHAS	%	N° DE FOLHAS	%	
1:500.000	68	42%	94	58%	162
1:250.000	400	72%	157	28%	557
1:100.000	2236	73%	814	27%	3050
1:50.000	1550	13%	10212	87%	11762
1:25.000	2000	4%	44250	96%	46250

FONTE: IBGE (1991)

Esta taxa inadequada de produção de mapas associada aos altos custos do processo convencional de mapeamento, não se compatibiliza com a disponibilidade reduzida de recursos do país nem com a urgente e crescente necessidade de mapas provocada pelo fluxo do desenvolvimento.

Portanto, a produção de mapas para suprir essa demanda, requer uma alternativa mais dinâmica e de menor custo, para o atual sistema de mapeamento. Uma excelente alternativa é a produção de Carta-Imagem através do uso da tecnologia de aquisição de dados por satélites, que oferece uma solução potencial, rápida e de baixo custo para países em desenvolvimento.

A idéia da Carta-Imagem não é nova, e pode ser visualizada como um estágio moderno das fotocartas e fotomosaicos, que são produtos derivados de fotografias aéreas analógicas, já tradicionalmente utilizados para fins cartográficos. O grande valor das fotocartas e fotomosaicos têm sido, a longo tempo, reconhecido na suplementação e substituição de mapas convencionais (Hood et al., 1989). Eles constituem um meio de produzir documentos cartográficos com rapidez e a custos muito baixos, quando comparados com mapas convencionais na mesma escala (Dixon-Gough, 1981).

Uma série completa de Cartas-Imagens pode ser editada para suprir as necessidades urgentes do país, até que uma série padrão do mapeamento sistemático esteja pronta.

A Carta-Imagem pode, também, ser impressa no verso de uma carta topográfica convencional, atualizada ou não, minimizando a necessidade de sobrepor dados cartográficos complementares na imagem, e simultaneamente fornecendo ao usuário informações cartográficas adicionais sobre a área (Brownworth e Rohde, 1986).

Além do emprego na complementação do mapeamento sistemático, as Cartas-Imagens terão o seu mais vasto campo de aplicações em outras classes específicas de mapas, que normalmente se apóiam no arcabouço da cartografia básica. Cartografia aeronáutica, mapas turísticos, mapas geológicos, mapas pedológicos, programas de avaliação de recursos minerais, programas de monitoramento ambiental e outros projetos científicos são exemplos de atividades que podem utilizar diretamente a Carta-Imagem. Vários países do mundo têm aplicado maciçamente esta tecnologia obtendo bons resultados (Abdalla, 1991).

2.2 - ESTUDOS E PESQUISAS ANTERIORES

Um grande número de estudos experimentais e projetos já consolidados têm demonstrado que é altamente vantajosa a elaboração de Carta-Imagem por processos digitais, constituindo uma alternativa econômica, rápida e eficiente para problemas de mapeamento.

Lillesand e Lo (1985), por exemplo, fazem a descrição de um programa experimental conduzido pela Universidade do Estado de Wisconsin para

demonstrar a flexibilidade da Carta-Imagem, e avaliar a viabilidade do seu uso no mapeamento para gerenciamento de recursos naturais e artificiais a nível de todo o Estado, utilizando dados TM-Landsat. Ótimos resultados foram reportados e o produto final desta experiência foi a Carta-Imagem da Baía de Sturgeon, acompanhada de 7 submapas de estudos específicos na escala de 1:62.000, utilizando as bandas principais TM1, TM2 e TM3.

Kahler e Milkus (1986), alcançaram resultados significativos nas experiências que conduziram para construção da Carta-Imagem de Berlin, na escala de 1:100.000, a partir das bandas 1, 2 e 3 do sensor TM, utilizando processos inteiramente digitais, desenvolvidos e implementados no Departamento de Fotogrametria e Cartografia da Universidade Técnica de Berlin.

Um dos mais arrojados programas de aplicação de Carta-Imagem é o que vem sendo conduzido pelo "United States Geological Survey" (USGS), organização que é o principal responsável pelo mapeamento sistemático americano. O programa, que foi concebido inicialmente como projeto experimental, preparou e publicou várias Cartas-Imagens, e começou praticamente com as fotografias do programa Apollo que foram tiradas em 1969, a partir da espaçonave Apollo-9, utilizando quatro câmeras multiespectrais montadas coaxialmente e com bandas muito próximas das planejadas para os sensores do satélite Landsat-1.

Três Cartas-Imagens experimentais preparadas pelo USGS com dados TM (Dyersburg, Great Salt Lake e Washington, DC.) e várias outras com dados MSS, permitiram o desenvolvimento de uma tecnologia própria para produção de Cartas-Imagens com dados Landsat. A primeira (Carta-Imagem de Dyersburg), foi elaborada em 1983, na escala de 1:100.000, utilizando as bandas TM2, TM3 e TM5 e impressa juntamente com o mapa topográfico, numa mesma folha em frente e verso. Esta carta foi baseada numa única cena TM-Landsat-4. A segunda (Carta-Imagem de Great Salt Lake, Utah), elaborada em 1985, na escala de 1:125.000, a partir da mosaicagem de 4 imagens, utilizando as bandas TM1, TM2, TM3 e TM4, foi combinada com curvas de níveis extraídas de mapas. Sua precisão geométrica, entretanto, não atingiu os padrões de precisão dos mapas americanos, indicando um RMSE de 79 metros. A terceira (Washington, DC), foi elaborada na escala de 1:100.000, utilizando as bandas TM1, TM3 e TM5 para os canais principais.

O sucesso alcançado nestas experiências fez com que, a partir de 1984 as Cartas-Imagens utilizando dados da plataforma Landsat passassem a integrar o programa oficial de mapeamento dos Estados Unidos. O USGS. passou, então a produzir cerca de 20 Cartas-Imagens anualmente, utilizando dados MSS e TM para as escalas de 1:250.000 e 1:100.000, respectivamente (Brownworth e Rohde, 1986). O relatório do USGS para os anos 90 reporta uma cobertura superior a 70% do território dos EUA, em várias escalas, incluindo produtos derivados de fotografias aéreas e de imagens Landsat, e registra ainda, uma demanda crescente por estes produtos no formato digital para uso em Sistemas de Informações Geográficas (Ramey, 1992).

No Brasil, uma das primeiras experiências com a Carta-Imagem utilizando dados do sensor TM foi feita a partir de recursos e insumos das pesquisas realizadas pelo PADCT e pelo Grupo de Trabalho sobre Carta-Imagem, da COCAR, integrado pelas seguintes entidades: CPRM (coordenação), IBGE, DSG, INPE, ICA, DNPM, UERJ, PETROBRAS, EMBRAPA, SBC e ANEA, com a cooperação técnica do USGS. O resultado foi a Carta-Imagem de Barbacena, na escala de 1:250.000, editada experimentalmente, em novembro de 1987 (Barbosa e Serra, 1988).

Algumas iniciativas na produção de Carta-Imagem têm sido conduzidas pela CPRM, ITCF, ICA e outros. Entretanto, estas cartas vêm sendo produzidas, ou com imagens simples ou através da mosaicagem de imagens analógicas e pouco uso tem sido feito do processamento digital adequado para extrair todas as potencialidades da imagem Landsat.

Estes estudos pioneiros prestaram uma grande contribuição aos cartógrafos e outros cientistas ligados às áreas de mapeamento e dos recursos naturais, e serviram de base inicial para elaboração deste trabalho.

2.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM-LANDSAT-5

Ao longo de todo o processo de imageamento, distorções, degradações e ruídos de diversas ordens, são introduzidos nos dados Landsat. Estas anomalias são provocadas por variações na iluminação, nas condições atmosféricas, no ângulo solar, no ângulo de visada do sensor, na transmissão dos dados, sendo também provocadas pelos erros sistemáticos instrumentais. Estes efeitos devem ser eliminados ou

pelo menos minimizados, do contrário, poderão ter um impacto significativo na precisão dos resultados de análises posteriores realizadas sobre a imagem (Jensen, 1986).

Operações de pré-processamento são, assim, necessárias para remover as variações espúrias incorporadas aos dados, de tal forma que os seus efeitos sejam minimizados (Moik, 1980). As correções de pré-processamento dos dados TM são realizadas pelo Sistema de Processamento de Imagens TM Landsat, e as imagens fornecidas ao usuário sob forma de fita magnética ou produto fotográfico, geralmente, já são processadas num nível de correções geométricas e radiométricas suficiente para um grande número de aplicações (Clark, 1990). Entretanto, se imagens não corrigidas forem utilizadas, será necessária a aplicação do chamado "bulk processing".

O pré-processamento está fundamentado no conhecimento das características das fontes causadoras dos erros. As correções radiométricas mais usuais aplicam-se para reduzir o efeito atmosférico, corrigir linhas ou pixels degradados, ajustar as diferenças na resposta dos detectores e eliminar ruídos de alta frequência (Richards, 1986). As correções geométricas consistem na aplicação de transformações com base em dados da plataforma, conhecidos *a priori* ou transmitidos por telemetria e no conhecimento das distorções internas do sensor (transformação inversa do modelo da geometria de varredura). São aplicadas para corrigir o desvio da varredura, variações de velocidade da espaçonave, o efeito da rotação da Terra, as variações na velocidade de varredura do espelho, a curvatura da Terra, distorções panorâmicas, mudanças na atitude do sistema sensor e variações de altitude (Bernstein, 1983).

2.4 - SISTEMA DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA

Um sistema de projeção cartográfica resulta de uma transformação matemática executada sobre os pontos da superfície terrestre, de forma a representá-los sobre uma superfície plana. O modelo matemático teórico da Terra, nesse caso, é um elipsóide de revolução. As superfícies de projeção podem ser planos, cilindros ou cones, que podem, por sua vez, ser secantes ou tangentes à superfície elipsóidica, dependendo das propriedades que se deseje conservar ou realçar na transformação.

A forma projetada (plana) de representação reúne uma série de vantagens sobre a forma elipsóidica original. Entretanto, qualquer projeção de uma superfície curva sobre um plano provoca alterações nos comprimentos, nas formas ou

nas áreas dos elementos originais. Um sistema que conserve algum destes atributos (por exemplo, distâncias), forçosamente deformará os demais (áreas e formas) e vice-versa. Deste modo, não existe um sistema de projeção ideal. Qualquer que seja o sistema escolhido, constituirá apenas a melhor forma de representação da superfície terrestre para um determinado objetivo.

Existem inúmeras formas de classificação das projeções cartográficas. Um critério comum, bastante aceito pelos cartógrafos, é a divisão segundo os três tópicos abaixo (Richardus e Adler, 1972).

- 1) A natureza da superfície de projeção: plana, cilíndrica e cônica.
- 2) O tipo de contato entre o elipsóide e a superfície de projeção: tangente, secante e polisuperficial.
- 3) A posição da superfície de projeção em relação ao elipsóide terrestre: normal, transversa e oblíqua.

A transformação dos pontos terrestres para o plano de projeção requer o estabelecimento de sistemas de coordenadas para garantir uma correspondência em ambas as superfícies. As coordenadas no modelo elipsóidico terrestre são expressas em termos de latitude e longitude geodésicas. As coordenadas no plano de projeção são expressas num sistema cartesiano retangular com o eixo X positivo apontando para Este e eixo Y positivo apontando para Norte. A relação entre as coordenadas elipsóidicas e as coordenadas no plano são dadas pela lei da projeção que é característica de cada sistema particular de projeção. Descrições matemáticas mais aprofundadas sobre projeções podem ser obtidas em Richardus e Adler (1972) e Robinson et al. (1978).

2.4.1 - PROJEÇÕES PERSPECTIVAS

As imagens fotográficas obtidas através de câmaras aéreas ou espaciais são consideradas projeções perspectivas da superfície terrestre, desde que o eixo da câmara seja mantido a nadir (Moik, 1980).

Projeções perspectivas são baseadas em princípios geométricos simples. O eixo de projeção é perpendicular ao elipsóide e à superfície de projeção. O

centro de projeção é a intercessão do plano com o eixo que é coincidente com a normal ao elipsóide. Qualquer ponto situado sobre o eixo de projeção serve como ponto de perspectiva e as linhas retas que passam por este ponto e por pontos da superfície terrestre determinam os seus correspondentes no plano de projeção.

Se o plano de projeção é tangente à superfície terrestre, não haverá distorção no centro de projeção, e todos os círculos máximos que passam pelo ponto de tangência terão suas transformadas no plano representadas por linhas retas. Qualquer deslocamento do plano ao longo do eixo de projeção modificará apenas a escala (Richardus e Adler, 1972).

2.4.2 - PROJEÇÃO DAS IMAGENS ORBITAIS

As imagens de sensoriamento remoto orbital, obtidas por "*scanners*", podem ser consideradas muito próximas de uma projeção perspectiva unidimensional do objeto imageado na direção da varredura (Moik, 1980). Assim, incorporam as distorções inerentes àquele sistema. Além disso, as imagens estão sujeitas às distorções geométricas discutidas na seção 2.3.

A rigor, a transformação de uma imagem para um determinado sistema de projeção cartográfica envolveria dois passos. O primeiro seria o estabelecimento da equação para transformação dos pontos da imagem distorcida em coordenadas geodésicas. O Segundo passo seria determinar, através das equações da projeção desejada, as coordenadas X e Y dos pontos no plano de projeção. Por último, escalar as coordenadas do plano de projeção para produzir uma matriz de M linhas por N colunas com a imagem no sistema desejado.

Na prática, este processo pode produzir discontinuidades. O que se costuma fazer é o processo inverso: seleciona-se um conjunto de pontos definindo um quadriculado de interpolação na projeção desejada e a transformação inversa exata é feita para os vértices do quadriculado, calculando-se os demais pontos por interpolação (Moik, 1980).

Os procedimentos para colocação das imagens TM num sistema de projeção com base na geometria de imageamento, geralmente são feitos em conjunto com o pré-processamento, já discutido na seção 2.3, e as imagens são fornecidas nas

projeções Espacial Obliqua de Mercator (SOM) ou Universal Transversa de Mercator (UTM).

Uma outra forma comum de transformar as imagens para um sistema de projeção desejado, é através da utilização de pontos de controle terrestres e modelos de ajuste polinomial, seguido de reamostragem. Este assunto será abordado na seção 2.6.

2.4.3 - A PROJEÇÃO SOM

A projeção SOM requer um mínimo de reamostragem de pixels, necessitando menos tempo de processamento. As imagens processadas pelo sistema são geralmente referenciadas, de forma automática, a esta projeção, caso não seja especificado outro tipo (Bryant et al., 1985; Clark, 1990).

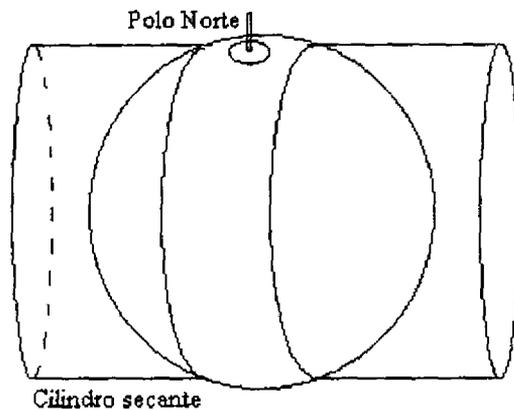
O sistema SOM consiste numa projeção cilíndrica oblíqua ao eixo polar e tangente ao elipsóide terrestre. O meridiano central da projeção é a própria órbita do satélite Landsat. A amplitude do fuso é limitada pela largura da varredura. A geometria de projeção é única para cada cena. Não há deformações de escala no centro da varredura, ocorrendo ampliações máximas nos extremos da imagem. A projeção SOM produz distorções mínimas para uma imagem, considerada isoladamente (Colvocoresses, 1974, 1986; Snyder, 1986). Ver ilustração na Figura 2.1.

2.4.4 - A PROJEÇÃO UTM

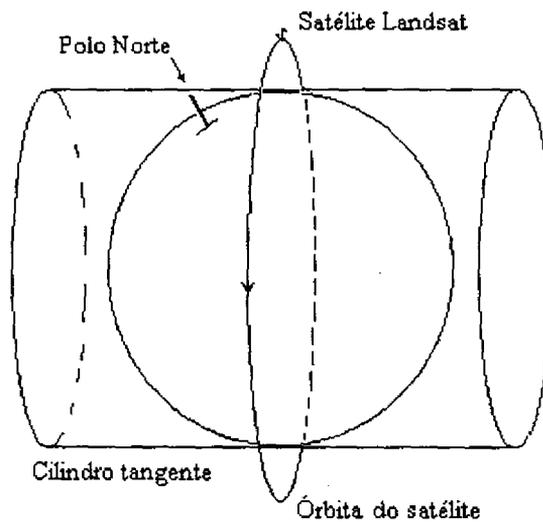
A projeção adotada no Mapeamento Sistemático Brasileiro é o Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), que é também um dos mais utilizados no mundo inteiro. A projeção UTM é um caso particular da Projeção Transversa de Mercator com as características abaixo:

- 1) A superfície de projeção é um cilindro cujo eixo é perpendicular ao eixo polar. O cilindro é secante ao elipsóide segundo dois meridianos, ao longo dos quais não ocorrem deformações. As áreas entre os meridianos de secância sofrem reduções e as áreas fora dos meridianos de secância são ampliadas, desta forma permite-se que as distorções de escala sejam distribuídas ao longo do fuso. Ver ilustração na Figura 2.1.

- 2) O elipsóide terrestre é dividido em 60 fusos parciais com 6 graus de amplitude cada . O coeficiente de redução máxima ocorre ao longo do meridiano central e tem o valor constante de 0.9996. A origem do sistema cartesiano de coordenadas é formada pelo meridiano central (eixo Y) cujo valor é 500.000,00 metros, e pelo equador (eixo X) que tem valor 0,00 metros, para coordenadas no hemisfério norte e 10.000.000,00 metros, para coordenadas no hemisfério sul (visando a evitar coordenadas negativas).



PROJEÇÃO UTM



PROJEÇÃO SOM

Fig. 2.1 - Esquema ilustrativo das projeções mais utilizadas nas imagens Landsat.

Projeção UTM e projeção SOM.

Adaptada de Colvocoresses (1974), p. 921.

2.4.5 - A PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT

Um outro sistema de largo uso, principalmente em cartografia aeronáutica, é a projeção cônica conforme de Lambert com dois paralelos padrões. A projeção de Lambert é uma projeção cônica com dois paralelos de secância, cujo objetivo é distribuir melhor as distorções de escala. Nesta projeção, o eixo do cone é coincidente com o eixo de rotação do elipsóide, os meridianos são representados por linhas retas que convergem para o vértice do cone, os paralelos são círculos concêntricos com o centro no vértice do cone, e não existem distorções ao longo dos paralelos de secância. Como as deformações dependem somente da latitude, a projeção de Lambert é especialmente apropriada para áreas que se estendem na direção Este-Oeste (Richardus e Adler, 1972).

2.5 - SELEÇÃO DAS MELHORES BANDAS

Um passo importante, que terá influência sobre as etapas subseqüentes e pesará na qualidade do produto final, é a seleção adequada das três bandas que serão associadas aos canais RGB (vermelho, verde e azul) para formar a composição colorida. Este assunto têm sido extensivamente estudado, e vários métodos foram desenvolvidos com objetivo de chegar automaticamente a uma seleção otimizada de três bandas, com base, principalmente, na estatística das bandas (Chavez et al., 1984; Sheffield, 1984). Num dos estudos mais recentes sobre o assunto feito no INPE, Galvão (1989) procedeu a uma avaliação de várias técnicas de seleção de bandas em aplicações específicas para discriminação de rochas. Apesar da reconhecida utilidade dessas análises, o cartógrafo é forçado a levar em consideração outros fatores, tais como as convenções de cores cartográficas, as necessidades específicas do usuário e o fato de que o produto final será impresso por processos litográficos. Assim, as bandas finais e a associação de cores, indicadas pelos processos estatísticos automáticos, no caso da Carta-Imagem, têm sido um pouco alteradas de forma a acomodar esses fatores e atingir uma faixa mais ampla de usuários (Colvocoresses, 1986).

As bandas TM têm sido usualmente escolhidas com base na experiência, levando-se em consideração, principalmente, alguns dos seguintes aspectos:

- 1) As imagens TM estão disponíveis em sete diferentes canais espectrais, três no visível (TM1, azul 0.45-0.52 μm ; TM2, verde 0.52-0.60 μm ; e TM3, vermelho 0.63-0.69 μm) e quatro no infravermelho (TM4, 0.76-0.90 μm ; TM5, 1.55-1.75 μm ; TM7, 2.08-2.35 μm ; e TM6, 10.40-12.50 μm). Selecionando-se as bandas TM1, TM2 e TM3 do visível e associando-se às cores azul, verde e vermelho, respectivamente, é possível obter o que se chama composição de cores naturais. Associando-se as cores numa ordem diferente da anterior ou utilizando-se uma ou mais bandas do infravermelho resulta numa composição colorida falsa cor.
- 2) Em várias aplicações de sensoriamento remoto é mais importante realçar certas informações espectrais da cena do que manter a fidelidade das cores dos objetos. Neste caso, pode-se escolher qualquer combinação de três bandas que melhor destaque as propriedades de interesse, não importando se as cores manterão similaridade com os padrões verdadeiros. É o caso, por exemplo, da clássica composição infravermelho falsa cor dos canais TM2, TM3 e TM4 nas cores azul, verde e vermelho, onde a vegetação sadia aparece na cor magenta.
- 3) No caso de Cartas-Imagens destinadas a substituir ou suplementar mapas topográficos, visando a atingir uma ampla faixa de usuários, a clareza e a simplicidade de interpretação são qualidades essenciais. É importante, portanto, um certo grau de similaridade com as cores convencionais e outros aspectos de familiaridade do usuário.
- 4) Até o momento, combinações coloridas bastante empregadas têm utilizado os triplete de bandas TM1, TM2, TM3; TM2, TM3, TM4; TM2, TM3, TM5 e TM3, TM4, TM5 com diferentes arranjos das cores azul, verde, vermelho. A experiência tem mostrado que as composições coloridas obtidas com as bandas TM1, TM2, TM3 (visível), por serem muito correlacionadas e sujeitas aos efeitos atmosféricos costumam apresentar baixo contraste e pouca variação de cores, mascarando certas feições. A utilização das bandas TM2, TM3, TM4 ou TM2, TM3, TM5 superam alguns desses problemas, porém, podem produzir distâncias muito grandes das cores naturais, principalmente no tocante à vegetação. As bandas TM3, TM4, TM5 costumam alterar as cores naturais na vegetação menos densa e nos solos descobertos.

O objetivo perseguido na Carta-Imagem é uma combinação que represente um compromisso entre cores de fácil interpretação, apresente um bom contraste geral, produza um destaque das feições de relevo e uso do solo, e proporcione um realce das feições lineares como as estradas e a drenagem. Para alcançar este propósito, além da seleção adequada das bandas, será necessária a aplicação de vários processamentos de realce que serão discutidos nas seções 2.9 e 2.10.

2.6 - CORREÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRECISÃO GEOMÉTRICA

Um dos pontos-chaves quando se trata de uso de imagens Landsat para fins de mapeamento é a questão da correção das distorções geométricas, visando a atingir os padrões especificados para cada escala de mapeamento. A legislação cartográfica nacional estabelece que 90% dos pontos bem definidos numa carta topográfica, não poderão ter um erro superior a 0.5 mm na escala da carta. Este é o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para as cartas classe A, adotado pela maioria dos países do mundo. Portanto, os processos de correção geométrica aplicados às imagens que se destinem a atualizar ou substituir produtos cartográficos devem atingir estas especificações.

2.6.1 - TÉCNICAS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA

Existem basicamente duas técnicas para correção dos variados tipos de distorções geométricas que afetam as imagens de satélites. A primeira abordagem, baseia-se na modelagem da natureza e da magnitude das fontes de erros, estabelecendo fórmulas determinísticas de correção a partir destes modelos. Esta técnica só é efetiva quando a geometria do imageamento é muito bem caracterizada, depende, portanto, de dados precisos da plataforma e do sensor. É considerada de aplicação mais difícil e no caso das imagens TM é utilizada normalmente para fazer as correções de sistema. Em recente estudo realizado no INPE, Figueiredo (1990) conduziu pesquisas que resultaram na geração de mosaicos de imagens de índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) obtidos a partir de imagens NOAA/AVHRR. No seu trabalho as imagens são corrigidas e juntadas através de um modelo de navegação que considera a geometria da varredura do sensor, propiciando a geocodificação dos pixels da imagem NOAA/AVHRR.

A segunda técnica para correção geométrica, a mais comumente utilizada, é baseada no estabelecimento de relações matemáticas entre endereços de pixels na imagem e as correspondentes coordenadas de terreno num dado sistema de projeção. Estas relações, conhecidas como transformações polinomiais, corrigem a geometria da imagem independente do conhecimento da natureza das distorções. Independe, portanto, da plataforma utilizada para aquisição das imagens (Richards, 1986).

2.6.2 - TRANSFORMAÇÕES POLINOMIAIS

Uma transformação por polinômios é um processo de dois estágios. O primeiro, consiste em estabelecer uma relação matemática entre as coordenadas (coluna, linha) de alguns pixels com as suas correspondentes coordenadas de terreno (E, N) na projeção desejada, estabelecendo uma aproximação da função de transformação entre os dois sistemas, através de modelos estatísticos de regressão. No segundo estágio, a imagem de entrada é reamostrada para uma grade regular no sistema de projeção. Este tipo de transformação pode ser modelada por dois polinômios bidimensionais de ordem m (Moik, 1980).

$$X' = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} X^j Y^k \quad (2.1)$$

$$Y' = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} b_{jk} X^j Y^k$$

A transformação é linear nos coeficientes a_{jk} e b_{jk} , propriedade que permite a aplicação do método dos mínimos quadrados na determinação destes coeficientes a partir de um conjunto de pontos homólogos no terreno (X, Y) e na imagem (X', Y'), denominados Pontos de Controle (PCs).

Se a transformação geométrica varia espacialmente de forma lenta e gradual, polinômios de baixa ordem ($m = 1, 2$ ou 3) modelam com uma boa aproximação a função de transformação real. Fazendo-se $m = 1$, o modelo (polinômio de primeiro grau) é dado por

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y \\ Y' &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y \end{aligned} \quad (2.2)$$

Fazendo-se $m = 2$, o modelo (polinômio do segundo grau) é dado por

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{11}XY + a_{20}X^2 + a_{02}Y^2 \\ Y' &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y + b_{11}XY + b_{20}X^2 + b_{02}Y^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Fazendo-se $m = 3$, o modelo (polinômio do terceiro grau) é dado por

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{11}XY + a_{20}X^2 + a_{02}Y^2 + a_{21}X^2Y + \\ &\quad a_{12}XY^2 + a_{30}X^3 + a_{03}Y^3 \\ Y' &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y + b_{11}XY + b_{20}X^2 + b_{02}Y^2 + b_{21}X^2Y + \\ &\quad b_{12}XY^2 + b_{30}X^3 + b_{03}Y^3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde, X' e Y' são as posições (linha e coluna) na imagem original distorcida e X e Y são as posições correspondentes no mapa ou imagem corrigida e os a_{jk} , b_{jk} são os coeficientes de transformação entre os dois sistemas.

Welch et al. (1985) recomenda que a transformação seja acompanhada de uma avaliação da precisão geométrica através da análise do RMSE de um conjunto de pontos independentes, ou seja pontos não utilizados para determinação dos coeficientes dos polinômios. Se o RMSE exceder um valor tolerável, a transformação é rejeitada devendo ser refeita utilizando novos PCs ou modelos de ordem superior.

A expressão do RMSE é dada por

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X'_i - X_i)^2 + \sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2.5)$$

Onde, X e Y são as posições no mapa conhecidas a priori X'' e Y'' são as posições correspondentes, calculadas utilizando os coeficientes do modelo e n é o número de PCs utilizados na avaliação.

2.6.3 - REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS

Determinados os coeficientes de transformação através de um conjunto de Pontos de Controle, o próximo passo é estabelecer uma grade de pixels no sistema de coordenadas da imagem a ser corrigida e calcular, na imagem distorcida, a posição correspondente a cada um dos pixels da imagem a ser corrigida, Figura 2.2 a. O espaçamento da grade é escolhido de acordo com o tamanho do pixel desejado na imagem a ser corrigida. Os valores de níveis de cinza para a grade de pixels da imagem a ser corrigida são obtidos por um dos métodos usuais de interpolação de superfícies utilizados em sensoriamento remoto: vizinho mais próximo, interpolação bilinear ou por convolução cúbica (Jensen, 1986).

2.6.4 - INTERPOLAÇÃO

Difícilmente as coordenadas transformadas, calculadas através do polinômio, serão projetadas no exato centro de um pixel da imagem distorcida e, por conseguinte, algum método deve ser utilizado para decidir que valor de brilho deve ser escolhido para atribuir ao pixel na imagem corrigida. Existem basicamente três métodos para solucionar esta questão. A Figura 2.2 (b, c e d) ilustra os três processos.

1) Interpolação por Vizinho Mais Próximo

O valor de brilho do pixel mais próximo da coordenada (X', Y') , calculada através do polinômio, será atribuído ao pixel da imagem corrigida. Este é o método mais eficiente em termos de tempo computacional e não altera o valor de brilho do pixel, ou seja, não serão criados novos valores de brilho diferentes dos originais.

2) Interpolação Bilinear

O valor de brilho para a imagem corrigida será obtido através da interpolação dos valores de brilho dos quatro pixels mais próximos da coordenada (X', Y') calculada. Duas interpolações são realizadas ao longo das linhas de varredura e uma terceira na direção ortogonal.

3) Interpolação por Convolução Cúbica

O valor de brilho para a imagem corrigida será obtido através da interpolação dos valores de brilho dos dezesseis pixels mais próximos da coordenada (X', Y') calculada. É obtido um valor interpolado para cada uma das quatro linhas de varredura, ajustado por polinômios do terceiro grau. O valor final é obtido interpolando os quatro pontos anteriores através de um quinto polinômio cúbico. De forma genérica este método produz os melhores resultados, porém demanda um tempo adicional de processamento muito grande.

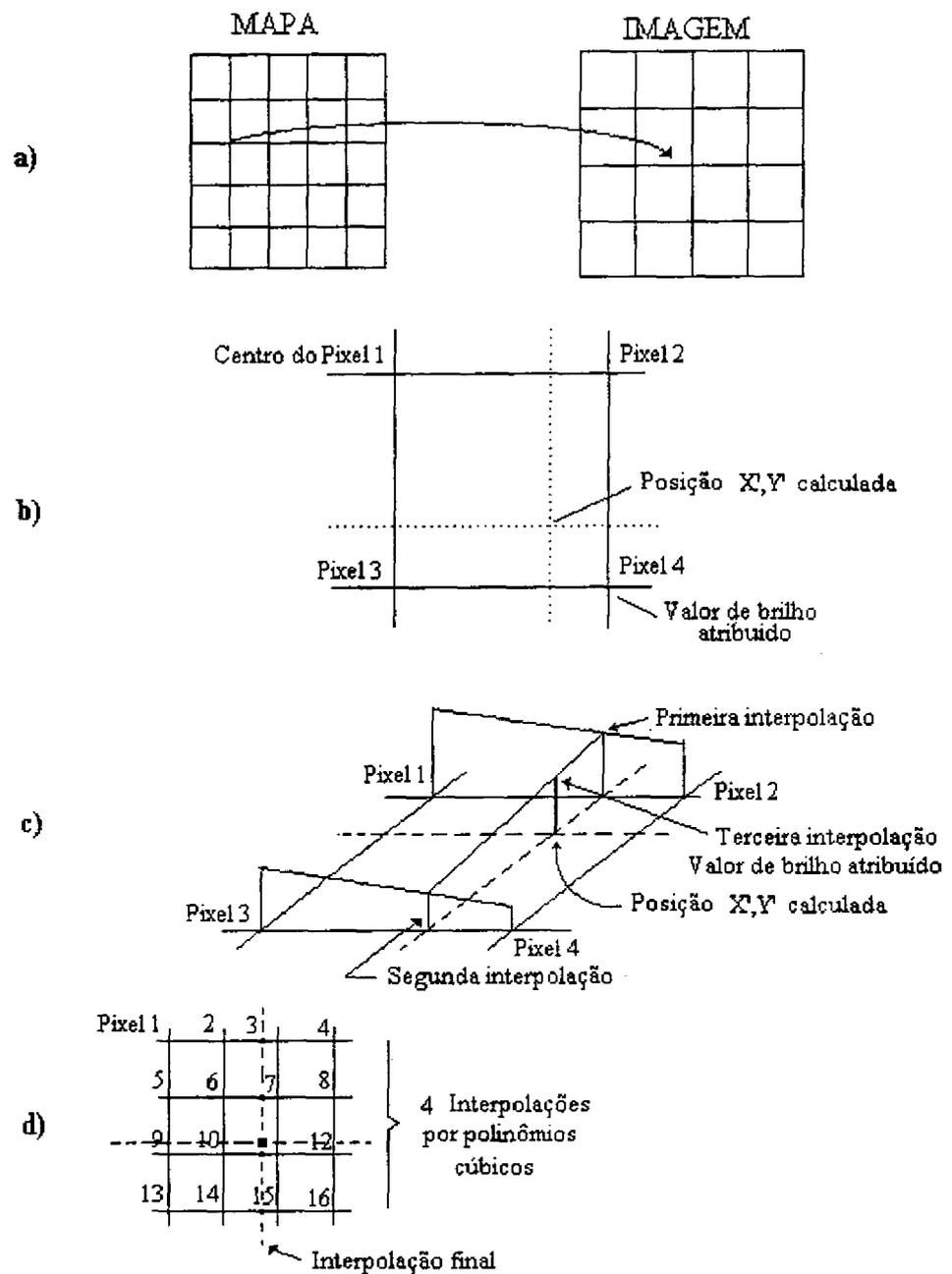


Fig. 2.2 - Reamostragem e métodos de interpolação utilizados em sensoriamento remoto
 a) correspondência dos pontos no sistema da imagem corrigida (mapa) e imagem distorcida, b) interpolação por vizinho mais próximo, c) interpolação bilinear e d) interpolação por convolução cúbica
 FONTE: Richards (1986), p. 53.

2.6.5 - DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

Da perfeita identificação e precisa medição dos Pontos de Controle terrestre, tanto na imagem quanto na carta ou no terreno, dependem a precisão da transformação e a fidelidade da avaliação geométrica das imagens. Os pontos de controle devem ser bem definidos e, de preferência, distribuídos uniformemente ao longo da imagem. Pontos de controle de má qualidade podem introduzir erros maiores que aqueles que se pretende corrigir.

Cruzamentos de estradas e de ruas, confluências de rios, pistas de pouso, cantos de culturas, etc, são os exemplos mais frequentemente utilizados. Suas coordenadas no sistema UTM podem ser obtidas por um dos seguintes processos, em ordem crescente de precisão e decrescente de custos: 1) levantamento topográfico amarrado a rede geodésica fundamental; 2) receptores de sinais de satélites do sistema GPS; e 3) cartas topográficas do mapeamento sistemático nas escalas de 1:50.000 e maiores.

2.6.6 - PRECISÃO DAS IMAGENS TM-LANDSAT-5

Após o lançamento dos satélites Landsat 4 e 5 inúmeros testes foram realizados para avaliar a precisão geométrica e o potencial cartográfico das imagens do sensor TM. Em face dos vários formatos das imagens processadas por diferentes sistemas e dos diferentes critérios utilizados nas análises, resultados muito divergentes têm sido encontrados na literatura.

Estudos bastante completos e confiáveis, como aqueles realizados por Welch et al. (1985), Bryant et al. (1985) e Borgerson et al. (1985), como parte do "NASA Landsat Investigations Data Quality Analysis Program" (LIDQA), apontaram para uma excelente fidelidade geométrica interna das imagens corrigidas pelo sistema americano. Os estudos concluíram por um Erro Médio Quadrático (RMSE) da ordem de subpixel (< 30 metros), quando se utiliza um bom controle de qualidade, e apontaram diferenças pouco significativas entre imagens nas projeções SOM e as transformadas para UTM. Devido à imprecisão dos dados enviados por telemetria, foram identificados deslocamentos de até 1 quilômetro nos indicadores de latitude e longitude, em relação à verdade terrestre, nas imagens processadas sem Pontos de Controle (Colvocoresses, 1986).

Em resumo, os estudos mostraram que a fidelidade geométrica ficou muito próxima das especificações de projeto do sistema, que estabelecem uma precisão dentro de 0.5 pixel (15 metros) numa banda simples sobre 90% dos pontos e dentro de 20 pixels (600 metros) para os indicadores de latitude e longitude. Transformações polinomiais com graus de 1 a 5 foram testadas, e concluiu-se que polinômios do primeiro grau e do segundo, com poucos pontos de controle terrestre, são adequados para ajustar uma imagem TM à verdade terrestre no sistema de projeção UTM ou outro qualquer, através de reamostragem. A reamostragem com uso de pontos de controle terrestre elimina os erros grosseiros de latitude e longitude e, teoricamente, deve melhorar a precisão interna.

Ainda como parte do LIDQA, foram comparadas imagens corrigidas, processadas por diferentes sistemas, como os do "Canadian Centre for Remote Sensing", "European Space Agency" e "National Space Development Agency" (agência espacial japonesa) e não foram encontradas diferenças significativas. Estes testes confirmaram que havia plena compatibilidade entre os dados TM processados nas diferentes estações terrestres espalhadas pelo mundo (Clark, 1990).

Não existem muitos estudos que possam quantificar com segurança a precisão das imagens TM processadas no Brasil, entretanto, é de se esperar que a precisão das imagens corrigidas geometricamente pelo sistema esteja muito próxima dos valores obtidos pelos testes internacionais.

d'Alge (1987) conduziu um estudo para avaliação da precisão das imagens TM corrigidas geometricamente pelo sistema, processadas em Cachoeira Paulista e chegou a valores de 32 a 45 metros para a precisão interna e pouco mais de 1000 metros para o erro de posicionamento.

2.7 - REMOÇÃO DE NUVENS

A presença de nuvens suprimindo informações nas faixas do visível e infravermelho têm afetado com muita frequência as imagens Landsat. As seguintes abordagens encontradas na literatura podem ser utilizadas para sua redução ou completa remoção.

- 1) A remoção de nuvens pode ocorrer simultaneamente com a operação de mosaicagem digital discutida na seção 2.8.2. Esta técnica pode ser vantajosamente aplicada em alguns casos favoráveis (Milgram, 1975).
- 2) Hord (1982) descreve um algoritmo muito simples para remoção de nuvens, baseado em imagens multitemporais, que pode ser resumido nos seguintes termos. Assumindo que A e B são imagens multitemporais da mesma área e que estejam perfeitamente registradas. Se A e B exibem considerável cobertura de nuvens, então uma nova imagem C derivada de A e B pode ser gerada. C terá uma menor cobertura de nuvens, tendo em vista a diferente distribuição das nuvens em A e B. O algoritmo em dois passos é dado por

1. $V_c = V_a$
2. Se $V_c > T$, $V_c = V_b$

(2.6)

onde, V_a , V_b e V_c são valores de cinza das imagens A, B e C respectivamente. Assim, a nova imagem será constituída de todos os pixels da imagem A que possuem um nível de cinza menor que um certo limiar T. Se o nível de cinza do pixel de A exceder o limiar T, então ele é considerado um pixel de nuvem, e o pixel da imagem B será atribuído.

- 3) Krug (1992) faz um estudo bastante completo do problema, estabelecendo vários métodos para estimar os valores dos pixels bloqueados por nuvens. O primeiro método estima os valores perdidos com base nas informações da vizinhança dentro da própria imagem. Os métodos restantes se utilizam da substituição da área bloqueada por dados multitemporais, valendo-se de processos estatísticos para corrigir as diferenças radiométricas que são inevitáveis em imagens de diferentes datas.

2.8 - MOSAICAGEM

A operação de mosaicagem consiste na combinação de várias imagens, cada uma cobrindo parte de determinada área de interesse, em uma única imagem abrangendo toda a área em questão. Assim, cada imagem parcial incorpora suas próprias distorções geométricas e seu próprio grau de degradação radiométrica específico.

A mosaicação presuppõe um percentual mínimo de superposição entre as imagens vizinhas para permitir uma montagem adequada do mosaico. Esta operação pode ser de duas naturezas: mosaicagem analógica, quando o mosaico é feito através do recorte e montagem de fotografias em papel, filme ou outro meio físico, de forma a dar a impressão de que todo o conjunto é resultante de uma única tomada de fotografia; e mosaicagem digital, quando feita a partir de imagens armazenadas na forma digital.

2.8.1 - MOSAICOS ANALÓGICOS

Os mosaicos analógicos têm sido muito utilizados em mapeamento como suplementação ou alternativas para mapas convencionais, entretanto suas aplicações ficam limitadas devido à sua forma fotográfica.

Um trabalho de grande envergadura, conduzido no Brasil na década de 70 e que produziu extensos mosaicos analógicos a partir de imagens de radar, foi o projeto RADAM (Radar da Amazônia) que imageou uma área de aproximadamente 4.600.000 km² do território nacional.

As imagens do RADAM foram obtidas por um radar imageador de visada lateral (SLAR) transportado a bordo de uma aeronave Caravelle, voando a uma altitude de 12 km e velocidade de 600 km/h. Além do radar imageador a aeronave transportava também os seguintes equipamentos de sensoriamento remoto e navegação: uma câmera aérea Zeiss RMKA 23/85 super grande angular, uma câmera I²S Mark I, um sistema de video tape com tres câmeras Javelin SC-950, duas plataformas inerciais LTN-51, um radar altímetro APN-195, um altímetro de diferencial barométrico Rosemount 803C, uma estação master SHORAN-RCA APN-84, um sistema de processamento digital Lancer e um gravador de fita Kenedy.

Os vôos do RADAM eram espaçados de 15 minutos de arco, garantindo uma superposição lateral das imagens de 25%, e geralmente orientados na direção Norte-Sul. As folhas de mosaico que cobriam uma área de 1 grau de latitude por 1.5 graus de longitude, cada uma, eram obtidas da forma como segue.

O primeiro passo foi o estabelecimento de uma rede de pontos calculados por fotogrametria ou radargrametria para serem *plottados* sobre um *overlay* de base estável com o objetivo de fornecer o suporte para controle geométrico do mosaico. Com base no *overlay*, as áreas de superposição do mesmo negativo de uma faixa radar eram ampliadas por meio de uma lente anamórfica que permitia ampliação diferencial em duas direções ortogonais. As cópias das faixas radar, assim preparadas, eram montadas sobre uma chapa rígida e coladas, resultando num enorme mosaico de 1.5 graus de longitude por 8 a 10 graus de latitude. Após a secagem da cola as faixas eram inspecionadas para verificar a continuidade das feições lineares como estradas e rios, e se os pontos de controle da base geométrica eram coincidentes. Seguindo-se a inspeção, os mosaicos individuais eram cortados, complementados com a toponímia e a grade de coordenadas geográficas e copiados para um negativo na escala de 1:250.000. Este negativo era juntado com uma moldura padrão para constituir o negativo final, a partir do qual as cópias finais dos mosaicos eram feitas (Roessel e Godoy, 1974).

2.8.2 - MOSAICOS DIGITAIS

Os mosaicos digitais apresentam uma série de vantagens sobre os mosaicos analógicos, visto que, tanto as componentes como o próprio mosaico podem ser submetidos a uma série de técnicas de processamento digital de imagens, tais como ajuste de tonalidade das cenas vizinhas, realce de contraste, filtragem, operações aritméticas, fusão de dados, etc., que não são possíveis nos mosaicos analógicos.

Na montagem de um mosaico digital, a partir de duas ou mais cenas com faixas de superposição, a junção entre as imagens é geralmente aparente. Frequentemente, estas bordas artificiais são mais visíveis que a informação honesta contida na imagem, e podem interferir na interpretação (Milgram, 1975).

As bordas são resultantes das mudanças ocorridas entre as épocas de aquisição das imagens. Neste intervalo de tempo, as condições atmosféricas podem ter variado, a umidade do solo pode estar diferente, mudanças sazonais podem ter ocorrido na vegetação, problemas de calibração do sensor podem ter acontecido, etc.

Basicamente duas abordagens podem ser consideradas para a mosaicagem digital. A primeira abordagem, mais simplificada, fundamenta-se no uso de poucas cenas e no pressuposto da obtenção de um perfeito registro entre as imagens

adjacentes. Um refinamento que pode melhorar a precisão do registro, é a escolha de pontos de controle comuns às imagens, na região de superposição. Assim, um mesmo ponto de controle poderá aparecer em até quatro imagens (Kaller e Milkus, 1986; Colvocoresses, 1986).

A segunda abordagem apóia-se na filosofia de sistemas de mosaicagem para grandes áreas, desenvolvido pelo "Jet Propulsion Laboratory" (JPL). Esta técnica é especialmente adequada para produzir mosaicos a partir de imagens contendo severas distorções geométricas (Zobrist et al., 1983).

A seguir será discutida a primeira abordagem por ser de aplicação mais prática e adequada para mosaicos a partir de imagens TM já dotadas de correções geométricas de sistema. A segunda, será brevemente introduzida na seção 2.8.4.

2.8.3 - MONTAGEM DE PEQUENOS MOSAICOS DIGITAIS

Um método simples para geração de mosaicos digitais sem junções aparentes a partir de cenas registradas, foi descrito em Milgram (1975) e refinado em Milgram (1977). Em resumo, quatro estágios são necessários na montagem de um mosaico digital.

- 1) O primeiro passo requer o perfeito registro das imagens, utilizando processos já discutidos nas seções 2.3 e 2.6.
- 2) No segundo passo, é necessário o ajuste da tonalidade de cinza de uma imagem em relação a outra, de forma que a média dos níveis de cinza nas regiões de superposição sejam semelhantes. Isto pode ser conseguido através de técnicas de ajuste de histograma (Richards, 1986). Após este passo as bordas tornam-se significativamente menos visíveis, apesar de ainda serem aparentes.
- 3) No terceiro passo, é criada uma linha irregular para junção das imagens. Um ponto de junção é escolhido para cada linha. A informação de cada linha no mosaico final à esquerda do ponto de junção será puxada do segmento de linha da imagem esquerda, e a imagem direita fornecerá a informação para o restante da linha do mosaico. O ponto de junção será escolhido onde o somatório das

diferenças de níveis de cinza sobre uma região de w pontos é mínimo, isto é, onde o valor da função $Df_{(n)}$ abaixo é mínimo.

$$Df_{(n)} = \sum_{i=-(w/2)+1}^{i=w/2} |E_{(n+i)} - D_{(n+i)}| \quad (2.7)$$

onde, $E_{(n)}$ ($n=1,2,\dots,K$) são os valores dos pixels da linha considerada da imagem esquerda na região de superposição; $D_{(n)}$ ($n=1,2,\dots,K$) são os valores dos pixels da linha considerada da imagem direita na região de superposição; n é um índice que indica a posição do pixel pesquisado; K é a largura da região de pesquisa que terá que ser menor do que a região de superposição; e w é uma máscara que percorre toda a extensão K , correspondente à largura da região para cálculo do somatório das diferenças ($Df_{(n)}$), que deve ser menor ou igual a K . No intuito de evitar o surgimento de bordas horizontais, um ótimo refinamento para este passo consiste em restringir o intervalo de escolha do ponto de junção de uma dada linha, dependendo da magnitude do $Df_{(n)}$ mínimo da linha anterior. Se o ponto de junção anterior teve um $Df_{(n)}$ mínimo elevado, é conveniente escolher o ponto de junção atual próximo do anterior. Se o $Df_{(n)}$ mínimo foi pequeno, a posição do ponto de junção não será tão crítica. Este refinamento incorpora a grande vantagem de contornar nuvens e outras feições presentes numa imagem e ausentes na outra.

- 4) Finalmente, o quarto passo consiste na suavização de eventuais abruptas diferenças de níveis de cinza na vizinhança do ponto de junção que por qualquer motivo tenham permanecido. Isso pode ser obtido através de uma transição gradual ou efeito de rampa.

Algumas variações desta abordagem podem ocorrer, fazendo-se a seleção manual dos pontos da linha de junção e aplicando-se diferentes técnicas para suavização na vizinhança da linha de junção (Miller, 1989; Shiren et al., 1989).

2.8.4 - GRANDES MOSAICOS DIGITAIS

Embora permitindo um bom registro geral, nenhuma das técnicas de modelagem para correção geométrica discutidas (modelo inverso da geometria de

imageamento ou modelagem por polinômios) obrigam o casamento de feições correspondentes na área de superposição. Isto pode causar descontinuidades da ordem de até dois pixels, nas imagens TM ao longo da junção, na operação de mosaicagem (Thormodsgard e Lillesand, 1987).

O JPL desenvolveu um eficiente sistema para produção de mosaicos denominado "Large Área Mosaicking System" (LAMS) que reduz sensivelmente as descontinuidades nas junções das imagens, utilizando um modelo de distorções composto, que compensa os erros da plataforma, rotaciona os eixos para o norte, estabelece um sistema de projeção e elimina os erros grosseiros de posicionamento geográfico.

O Sistema é relativamente complexo, porém, em resumo, quatro conceitos básicos podem ser identificados. O primeiro conceito envolve o uso de polígonos cuidadosamente definidos dentro da fronteira de cada imagem. Estes polígonos definem a localização das junções do mosaico, determinam onde uma rotina de correlação automática será aplicada para produzir pontos de controle de junção (dos quais se conhece as coordenadas de linha e coluna nas imagens adjacentes), e limitam o processamento ao pedaço da cena incluída no espaço do mosaico.

O segundo conceito envolve o ajustamento do sistema de referência dos pontos de controle de junção ao sistema dos pontos de controle terrestre.

O terceiro conceito envolve o uso de um modelo de distorção geométrica que corrige as distorções representadas nos pontos de controle terrestre (de distribuição mais espaçada), bem como as distorções representadas pelos pontos de controle de junção (de distribuição mais densificada). O modelo utiliza um método de ajustamento de superfícies por elementos finitos.

O quarto conceito envolve a obtenção de informação para correção de brilho, visando a ajustar as diferenças de tonalidade entre as imagens adjacentes. Uma descrição completa do método pode ser obtida em Zobrist et al. (1983).

2.9 - REALCE RADIOMÉTRICO DAS IMAGENS

Concluída a etapa da montagem do mosaico digital, a parte de interesse deve ser destacada para reduzir necessidades de memória e tempo de processamento. Sobre esta parte devem ser aplicados vários processamentos para enriquecer a qualidade visual e cartográfica da imagem. Os procedimentos básicos para realce radiométrico incluem:

- 1) Aplicação de um cuidadoso realce de contraste em cada componente para atingir um balanço adequado e uma faixa de cores ou tons de cinza compatível com a densidade do filme (fotolitos). Bons resultados podem ser obtidos através de transformações lineares multilíneas e não-lineares de contraste, para esticar ou comprimir dados. Estes procedimentos alteram a resposta, aumentando o contraste entre feições importantes de respostas levemente diferentes, ou então reduzindo o contraste de outras feições para limites utilizáveis (Moik, 1980; Richards, 1986).
- 2) Utilização de técnicas de filtragem passa-alta para realce de bordas. Uma técnica útil para realce isotrópico de bordas pode ser alcançada através de processamentos com base no operador Laplaciano (Hord, 1982; Moik, 1980).
- 3) Técnicas de limiarização para permitir filtragem seletiva. Estas técnicas são importantes para tratamento de feições de alto contraste ou para regiões onde uma ou mais classes de feições devem ser mostradas em detalhes (por exemplo, áreas formadas por feições de água e de terra ou, ainda, áreas compostas de culturas irrigadas e partes de solo nú). Não há razão para aplicar o mesmo filtro, o mesmo realce de contraste ou, até mesmo, as mesmas bandas para estas feições tão diferentes, e a limiarização representa uma forma automática para mascarar as modificações necessárias (Colvocoresses, 1986; Schowengerdt, 1983).

2.10 - REALCES ESPECIAIS

Dependendo das feições presentes na imagem e de sua distribuição espacial, e também, das bandas selecionadas e da concepção cartográfica específica, algumas técnicas adicionais de processamento serão necessárias para aumentar a

separabilidade entre os alvos presentes, melhorando a qualidade visual e facilitando a interpretação.

Se forem escolhidos, por exemplo, os canais TM3, TM2 e TM1, associados ao vermelho, verde e azul, nesta ordem, com o objetivo de criar uma composição com cores naturais, haverá dificuldades em distinguir massas d'água de florestas, bem como diferentes tipos de vegetação. Neste caso, utilizam-se adicionalmente bandas do infravermelho onde a separação entre estes alvos é mais evidente, e assim será possível atribuir-lhes cores cuidadosamente escolhidas ou processar a feição, de forma que seja aumentada a separabilidade. Cinco fases são necessárias para atingir este objetivo (Kahler e Milkus, 1986). Ver Figura 2.3.

- 1) Separação: Basicamente, duas diferentes técnicas podem ser utilizadas para separar alvos em imagens. A primeira, é através da simples limiarização em dois níveis. Por exemplo, 0 para água e 255 para as demais feições. No segundo caso, utilizam-se diferentes bandas espectrais do visível e infravermelho e áreas de treinamento para as classes de interesse. Neste caso, qualquer algoritmo de classificação poderá ser utilizado (máxima verossimilhança, mínima distância, etc). A técnica de classificação demanda mais tempo, porém, produz melhores resultados na separação das áreas de interesse.
- 2) Revisão interativa: Qualquer algoritmo de separação sempre produz erros, que podem ser corrigidos com um controle interativo e visual. Utilizando um sistema de processamento digital de imagens, o operador pode comparar o resultado da separação para identificar e corrigir pixels visivelmente mal classificados.
- 3) Mascaramento: Uma área correspondente a uma classe de objetos (água, floresta, etc) preenchida com nível de cinza de valor constante é utilizada como máscara para atribuir valor zero a todos os pixels homólogos nos canais principais.
- 4) Atribuição de cor: A mesma classe de objetos, utilizada anteriormente como máscara, é necessária aqui para preencher todos os pixels de sua área nos canais principais com o nível de cinza adequado. A combinação de diferentes níveis de

cinza nos três canais, azul, verde e vermelho, poderá produzir qualquer cor desejada para aquela região.

- 5) Substituição: A máscara de uma classe separada também pode ser usada para copiar a área de classe de objetos de uma banda espectral para outra, ou para somar os valores de níveis de cinza de uma banda em outra. Por exemplo, os valores dos pixels de florestas bem diferenciadas numa banda do infravermelho podem ser adicionados a banda 2 (verde) criando regiões de florestas diferenciadas numa Carta-Imagem de cores naturais.

Diferentes variações destas técnicas para outras combinações de canais podem ser utilizadas (Lillesand e Lo, 1985). Outros procedimentos para realce de feições localizados, funcionam à base de experimentação e dependem de um certo grau de subjetividade.

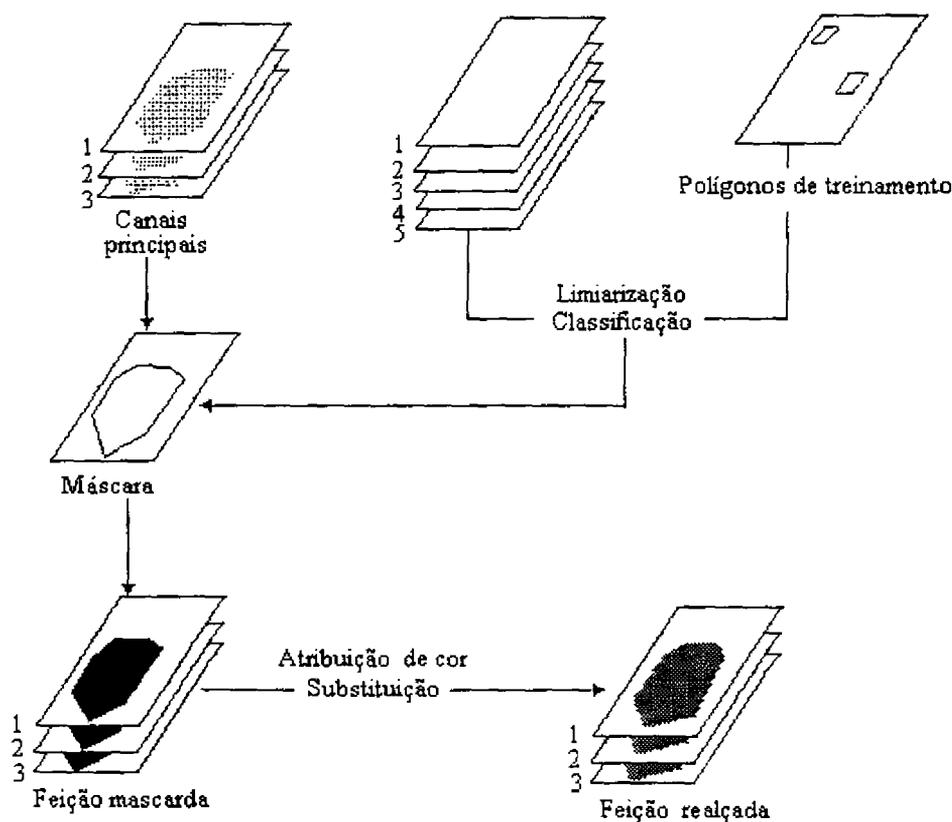


Fig. 2.3 - Esquema ilustrativo dos processos de separação, mascaramento, substituição e atribuição de cor.

Adaptada de Lillesand e Lo (1985), p. 768.

2.11 - PREPARO E REPRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

Recentemente grandes progressos têm sido alcançados na área de composição e reprodução de mapas. Com o advento dos modernos *plotters* a laser de alta resolução e o desenvolvimento de *softwares* apropriados, é possível transformar os valores de níveis de cinza de cada banda da imagem em reticulados digitais, considerando o ângulo adequado de orientação da retícula para cada banda de forma a evitar padrões indesejáveis na composição de cores.

As bandas espectrais reticuladas são gravadas em filmes pelo *plotter* a laser de alta resolução e estes filmes podem ser copiados diretamente nas chapas de impressão litográficas. A impressão litográfica reduz o custo de documentos que requerem grandes tiragens, como é o caso de mapas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nos Capítulos anteriores foram abordados vários dos aspectos teóricos básicos que formam o suporte do conhecimento científico relacionado com a Carta-Imagem. O presente Capítulo procura definir uma metodologia onde são apresentados os passos fundamentais que devem acompanhar a produção de uma Carta-Imagem utilizando métodos digitais. O diagrama de blocos da Figura 3.1 mostra de forma esquemática uma visão geral destas etapas onde é possível observar uma integração entre vários campos, notadamente, sensoriamento remoto, processamento de imagens e cartografia.

Antes de iniciar a caracterização de cada uma dessas etapas cabe observar que a atividade de produção sistemática de Carta-Imagem em médias e pequenas escalas (1:100.000, 1:250.000, 1:500.000 e 1:1.000.000, para quais as imagens Landsat são especialmente apropriadas, desde que submetidas a alguns tratamentos especiais para alargar feições lineares de interesse cartográfico como estradas e rios), seguindo a metodologia apresentada, envolve considerável volume de dados, necessita de altos investimentos em equipamentos computacionais, requer dispositivos de armazenamento de alta capacidade e receptores de satélites do sistema GPS. Assim, neste estudo, conforme mencionado na seção 1.1, procurou-se restringir a discussão da metodologia proposta em torno de três destes procedimentos: mosaicagem digital, realces especiais e remoção de nuvens. São etapas de peso relevante na produção digital de cartas, mas onde existem poucos estudos nas pesquisas científicas nacionais. Convém citar que Santos (1992) aplica conceitos que poderiam ser considerados uma operação de mosaico digital. O seu trabalho, entretanto visa à simulação de imagens do sensor do SSR/MECB com largo campo de visada (732 km), utilizando imagens TM de menor campo de visada (185 km). Na operação é utilizado um filtro de simulação sobre os dados TM de forma a obter cada pixel da imagem simulada. No presente estudo, não se faz necessário o uso de filtros de simulação, tendo em vista que é mantida, no mosaico, a mesma resolução espacial das imagens originais, e que estas imagens já foram reamostradas no sistema de projeção UTM.

O detalhamento minucioso destas três etapas (mosaicagem digital, realces especiais e remoção de nuvens) representa a parte substancial do trabalho, os

demais procedimentos da Figura 3.1, constitutivos da metodologia proposta para produção de Carta-Imagem, serão, apenas, brevemente introduzidos na ordem em que aparecem no intuito de prover uma visão geral de todo o processo.

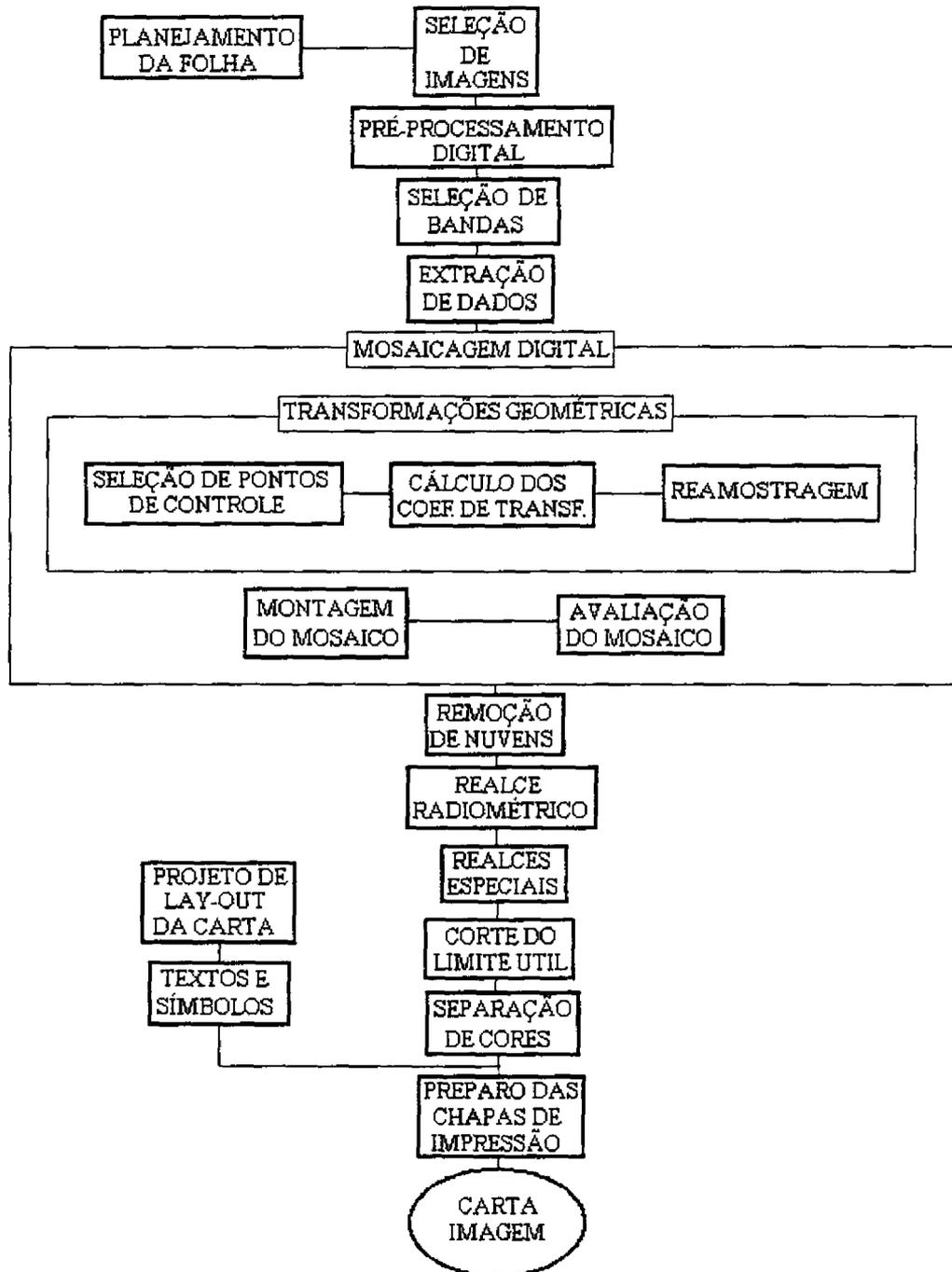


Fig. 3.1 - Diagrama de blocos das etapas de construção de uma Carta-Imagem utilizando métodos digitais.

3.1 - PLANEJAMENTO DA FOLHA

O primeiro passo do método é, necessariamente, um criterioso planejamento, pois uma Carta-Imagem de pequena e média escala, 1:100.000 e menores, cobre extensas áreas da superfície terrestre, requerendo um conjunto de várias imagens vizinhas. Portanto torna-se necessária a delimitação da área a ser mapeada em coordenadas geográficas, sobre outros mapas, croquis ou gráficos do sistema de referência órbita ponto (WRS), para facilitar a correta seleção de todas as imagens que serão necessárias ao trabalho.

O presente trabalho, conforme já foi citado na seção 1.1, tem como um de seus objetivos demonstrar a viabilidade das técnicas de mosaicagem digital, realces especiais e redução da cobertura de nuvens, para melhorar a qualidade do mapeamento por Carta-Imagem. Estas técnicas, uma vez testadas em pequenas áreas apropriadas para estudos, os resultados poderão ser generalizados para áreas maiores de características semelhantes. Partindo dessa premissa e considerando as questões de limitação de custos, tempo e equipamentos envolvidas neste estudo, optou-se por trabalhar sobre pequenas subimagens, contendo porém, rica variedade de feições de forma a torná-las representativas de imagens maiores.

Assim, as subimagens de estudo consideradas neste trabalho têm dimensões médias variando de 500 x 500 a 1000 x 1000 pixels e foram extraídas da região de superposição de duas órbitas vizinhas.

3.2 - SELEÇÃO DE IMAGENS

Dentro das linhas estabelecidas no tópico anterior foram selecionadas as imagens da Tabela 3.1, correspondentes ao litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, escolhidas de forma a garantir uma superposição de 14% da varredura total, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 3.2. Cada imagem corresponde a um quadrante de uma cena TM que cobre uma área aproximada de 92 x 92 quilômetros.

TABELA 3.1 - IMAGENS SELECIONADAS PARA APLICAÇÃO DOS CONCEITOS PROPOSTOS NESTE TRABALHO

ÓRBITA/PONTO	QUADRANTE	BANDAS	DATA
218/76	B	1, 2, 3, 4, 5 e 7	11/set/90
217/76	A	1, 2, 3, 4, 5 e 7	24/fev/90

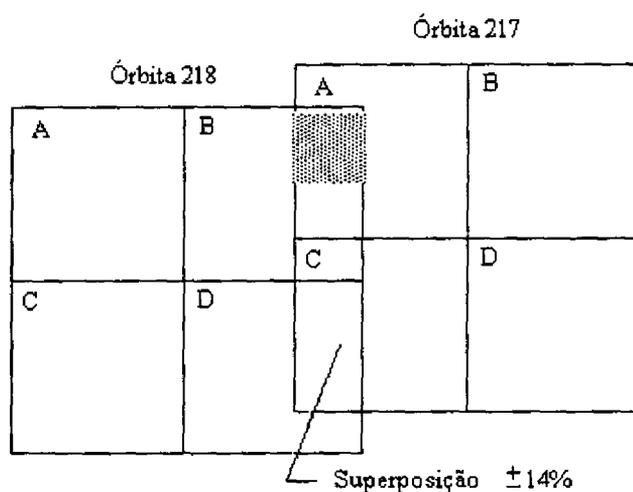


Fig. 3.2 - Esquema da disposição das imagens selecionadas, mostrando a área de trabalho em destaque

Em uma situação ideal devem ser escolhidas as imagens que cubram inteiramente a área geográfica de interesse, que sejam obtidas nas datas mais recentes, que possuam a menor incidência de nuvens possível, e no caso de imagens vizinhas, que tenham sido obtidas na mesma estação do ano. No caso deste trabalho, a seleção das imagens não seguiu alguns desses critérios no intuito de testar a eficiência dos algoritmos em situações adversas.

3.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS

A metodologia proposta neste trabalho pressupõe a utilização de imagens CCT-PT (Computer Compatible Tape Precision Type), que é um dos produtos padrões fornecidos pelo INPE (Souza, 1992), onde as imagens já passaram previamente por várias operações de correções radiométricas básicas e foram submetidas a um modelo rígido de correção geométrica que permite o estabelecimento de uma relação linear entre os pixels da imagem e suas coordenadas no sistema de projeção UTM. Neste caso utiliza-se um processo de reamostragem utilizando um interpolador por convolução cúbica (Produto Digital TM69x6). São operações denominadas correções de sistema, realizadas rotineiramente na Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE em Cachoeira Paulista (Serra, 1987).

3.4 - SELEÇÃO DE BANDAS

A seleção das melhores bandas para produzir uma boa composição colorida depende muito da distribuição espacial dos alvos e não é, teoricamente, uma operação trivial, tendo em vista que 6 bandas (excluindo a banda TM6, correspondente ao infravermelho termal) geram 20 combinações e 120 permutações. Entretanto, a experiência mostra que algumas destas combinações já podem ser de imediato eliminadas para regiões específicas. Assim, somente devem ser testadas as combinações e permutações que tenham alguma possibilidade de produzir bons resultados em aplicações cartográficas. Por exemplo, não são de interesse, neste caso específico onde a região possui vastas áreas de vegetação densa, composições que associem a banda TM4 à cor vermelha, visto que a vegetação densa teria sua aparência muito modificada, também não são convenientes combinações onde a água apresente cor avermelhada, etc.

Após diversas avaliações visuais, utilizando o sistema de tratamento de imagens do INPE (SITIM) e o sistema AEROGRAF do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), foram escolhidas, para o caso específico deste estudo, as bandas TM5, TM4 e TM3 nos canais vermelho, verde e azul respectivamente para formar a composição colorida para apresentação dos resultados. Esta composição mostrou-se adequada por representar a vasta área de vegetação densa na cor verde (a vegetação densa possui alta resposta na banda TM4 que foi associada ao verde).

3.5 - EXTRAÇÃO DE DADOS

Esta etapa refere-se à delimitação e extração das subimagens estritamente necessárias para prover a cobertura completa da área de interesse, reduzindo assim, recursos de memória e tempo de processamento. No caso específico deste trabalho, foram extraídas duas subimagens de aproximadamente 1000 x 1000 pixels de cada órbita dentro da área de superposição, Figura 3.2. Dentro destas subimagens foram escolhidos trechos específicos para aplicações das técnicas propostas dentro dos objetivos do trabalho.

3.6 - MOSAICAGEM DIGITAL DAS IMAGENS

Esta é uma das etapas fundamentais do método, tendo em vista que a Carta-Imagem geralmente requer duas ou mais imagens fontes, e o mosaico deve ter como resultado uma imagem maior que pareça originar-se de uma única cena. No enfoque metodológico deste trabalho, a montagem de mosaicos está fundamentada nas linhas gerais definidas por Milgran (1975) sendo porém, acrescidas de uma série de refinamentos adaptativos. Assim, antes de montar o mosaico propriamente dito algumas etapas preparatórias tornaram-se indispensáveis, uma vez que o objetivo final é a construção de cartas que deve obedecer a alguns critérios padrões já consagrados pelo uso ou estabelecidos na legislação cartográfica.

3.6.1 - TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA DAS IMAGENS

Conforme demonstrado por vários estudos discutidos na seção 2.6.6, as imagens TM corrigidas geometricamente pelo sistema e fornecidas pela DGI de Cachoeira Paulista possuem excelente precisão interna. Entretanto, para efeito de mapeamento as imagens devem ser registradas com Pontos de Controle (PCs) por três razões básicas.

- 1) Eliminar os erros grosseiros de posicionamento, ou seja os erros de translação em latitude e longitude apresentados pelas imagens com correção de sistema sem uso de PCs (baseada somente em dados de efemérides).

- 2) Orientar os eixos das imagens com relação ao Norte e Este geográficos, tendo em vista que seus eixos estão originalmente orientados com relação à linha de vôo e a direção da varredura.
- 3) Estabelecer o sistema de projeção desejado (UTM, neste caso) e fornecer uma referência comum para mosaicagem das imagens.

Para isto é necessário definir Pontos de Controle no sistema de cada imagem e do mapa, calcular coeficientes de transformação entre os sistemas de cada imagem e do mapa e reamostrar cada imagem no sistema do mapa.

3.6.2 - SELEÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE

A rigor, a forma mais confiável de obtenção de Pontos de Controle é através de levantamento de campo, utilizando métodos geodésicos ou rastreamento de satélites. Entretanto, este é um processo custoso em tempo e dinheiro, estando ao alcance, apenas, das instituições e empresas de maior porte.

Como alternativa menos adequada, porém mais barata, utilizam-se mapas em escalas grandes como fonte de Pontos de Controle. No caso deste trabalho, por limitações de custos, utilizou-se este processo. Os PCs foram extraídos das folhas do mapeamento sistemático nacional, de Mangaratiba e Angra dos Reis, na escala de 1:50.000.

Teoricamente, neste caso específico, podem ser obtidos PCs com com erro nominal de 25 metros, correspondentes ao PEC de 0.5 mm na escala de 1:50.000. Na prática, porém, o processo de extração de PCs de cartas incorpora várias incorreções que poderão introduzir erros de ordens, até mesmo, superiores àquelas que se pretende corrigir, conforme pode ser concluído através das seguintes análises.

- 1) Erros devidos às convenções cartográficas - As feições lineares como estradas, pontes, edificações, pistas de aeroportos, cais, etc, são representados nas cartas através de símbolos padronizados geralmente mais largos do que são na realidade, coincidentemente estes detalhes são os mais comumente utilizados na escolha de PCs.

- 2) Erros devidos à variação do relevo - A imagem de satélite pode ser considerada aproximadamente uma projeção perspectiva (Moik, 1980), portanto diferenças de altura com relação ao plano do terreno provocam um deslocamento no plano de projeção. Dois pontos na mesma latitude e longitude geográficas, porém com alturas diferentes serão projetados em diferentes posições na imagem. Já nos mapas, são utilizadas projeções ortogonais onde todos os pontos sobre uma linha vertical são projetados na mesma posição geográfica. Os erros devidos ao relevo são mais críticos na direção transversal à linha de vôo, atingindo o seu máximo no extremo da varredura. Na Figura 3.3, H representa a altitude de vôo do satélite Landsat (706 km), a distância s representa o deslocamento devido ao relevo, h corresponde à altitude do ponto P , e S é a metade da largura da varredura (92 km). O deslocamento de relevo, no ponto P , pode ser dado por $s = h * (S/H)$, mas $S/H = 92/706$. Donde $s = h * 0.13$, ou seja, 13% da altitude do ponto. Assim em regiões de relevo movimentado há necessidade de introduzir uma correção de relevo nos PCs (Binnie e Colvocoresses, 1987). Em Barbosa (1989) o mesmo assunto é considerado, porém voltado para imagens do satélite SPOT.
- 3) Erros de identificação e posicionamento do cursor - Muitas vezes a feição no mapa apresenta pequenas diferenças com relação à imagem, tornando-se difícil correlacioná-los devidamente na tela do monitor e na mesa digitalizadora. Isto ocorre, muitas vezes, devido a uma grande diferença de tempo entre a época de obtenção da imagem e a de construção do mapa.

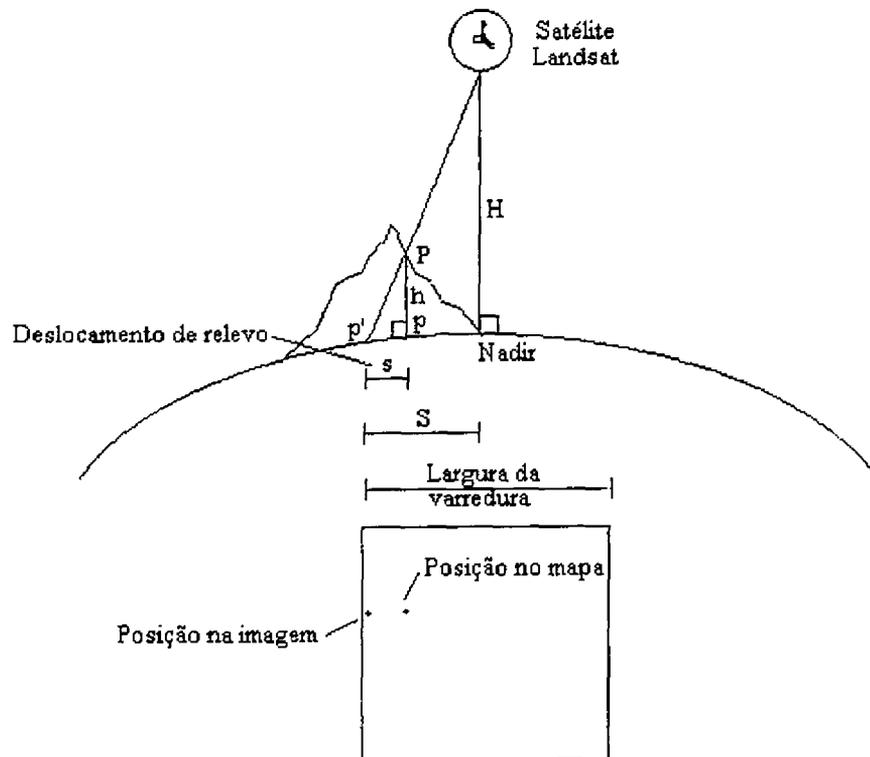


Fig. 3.3 - Deslocamentos devido ao relevo

FONTE: Binnie e Colvocoresses (1987) p.309.

Neste estudo, foram selecionados vários Pontos de Controle para cálculo dos coeficientes de transformação imagem-mapa, e outra quantidade similar para avaliação da qualidade da transformação, através do RMSE, conforme pode ser visto nas Tabelas 4.1 a 4.4, apresentadas no Capítulo 4. Durante o processo de seleção é inevitável a rejeição, passo a passo, dos pontos que apresentarem resíduos grosseiros, até que se atinja um RMSE compatível com o PEC dos mapas nacionais. Imagens TM processadas com correção de sistema geralmente requerem poucos Pontos de Controle (Welch et al., 1985).

3.6.3 - CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TRANSFORMAÇÃO

Considerando a excelente precisão interna das imagens TM processadas com correção de sistema, escolheu-se o modelo polinomial do primeiro grau para a transformação geométrica das imagens (Equações 3.1), conforme recomenda Welch et al. (1985). Este modelo corrige uma rotação, uma translação no eixo X, outra

translação no eixo Y e um fator de escala para cada um destes eixos, mantendo, porém, o paralelismo entre eles.

As equações do modelo são do tipo

$$\begin{aligned} X' &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y \\ Y' &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y \end{aligned} \quad (3.1)$$

Colocando-se na forma matricial tem-se

$$L = A \cdot B$$

onde:

$$L = \begin{matrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ \dots \\ \dots \\ X'_n \\ Y'_n \end{matrix} \quad A = \begin{matrix} 1 & X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_n & Y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n \end{matrix} \quad B = \begin{matrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ b_{00} \\ b_{10} \\ b_{01} \end{matrix}$$

A solução para os coeficientes é dada por

$$B = (A^T A)^{-1} \cdot A^T L \quad (\text{Neter e Wasserman, 1974}) \quad (3.2)$$

Com base na Equação 3.2 foi desenvolvido o programa CALCULA-COEFICIENTES, em linguagem C (ver Apêndice A) que recebe como entrada um arquivo de Pontos de Controle e fornece um arquivo de saída contendo quatro vetores de 6 coeficientes, na forma abaixo.

- 1) Vetor de transformação de pontos do sistema do mapa para pontos do sistema da imagem esquerda.

- 2) Vetor de transformação de pontos do sistema da imagem esquerda para pontos do sistema do mapa.
- 3) Vetor de transformação de pontos do sistema do mapa para pontos do sistema da imagem direita.
- 4) Vetor de transformação de pontos do sistema da imagem direita para pontos do sistema do mapa.

3.6.4 - REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS

Uma vez determinados os coeficientes de transformação o passo seguinte será a reamostragem das imagens no sistema do mapa. Foi desenvolvido um módulo (REAMOSTRAGEM) que recebe como entrada: o arquivo de coeficientes , as imagens esquerda e direita e fornece como saída: as imagens esquerda e direita corrigidas, utilizando um interpolador por vizinhança mais próxima, bem como um arquivo contendo dados de registro (dimensões das imagens transformadas, diferenças horizontais e verticais para montagem do mosaico e a largura e altura que terá o mosaico). A Figura 3.4 fornece uma visão esquemática das imagens de entrada e saída.

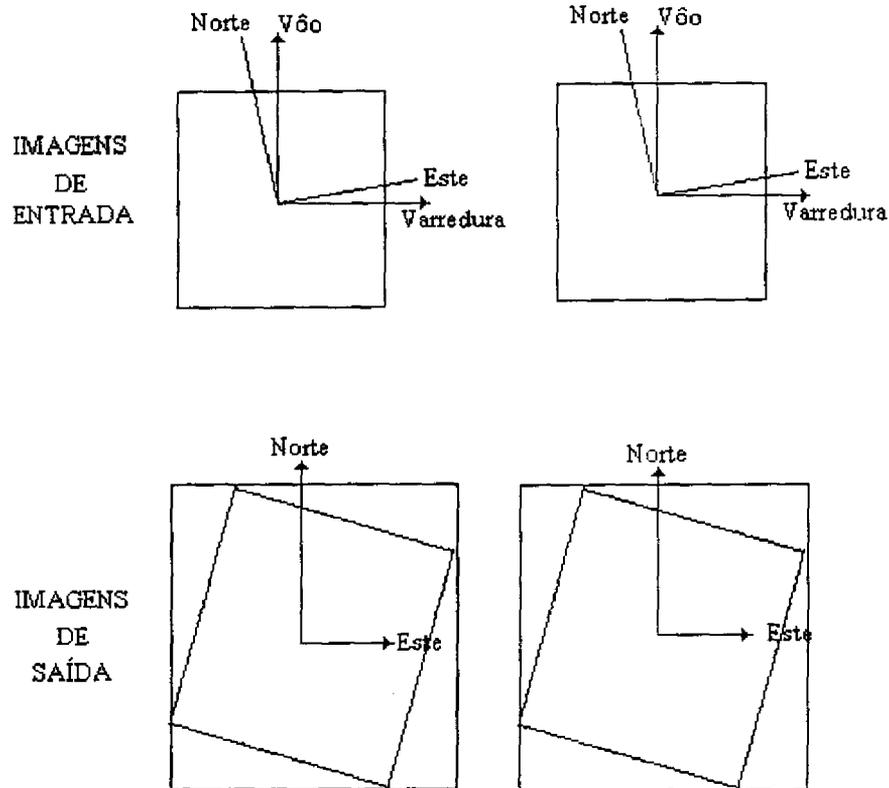


Fig. 3.4 - Diagrama representativo das imagens de entrada e saída do módulo de reamostragem

3.6.5 - MONTAGEM DO MOSAICO SEM CORREÇÃO

O mosaico sem qualquer correção é montado a partir dos dados fornecidos pelo módulo anterior. Para maior clareza, os passos do algoritmo para a montagem do mosaico são apresentados abaixo sob forma de pseudo-código. A listagem completa de todos os programas em linguagem C constam do Apêndice A.

INÍCIO-MÓDULO

Começar pela imagem mais alta

ENQUANTO pixel processado não atingir a imagem mais baixa

Cada linha do mosaico recebe zeros no lado referente à imagem mais baixa
mais os pixels da linha da imagem mais alta

FIM-ENQ

ENQUANTO pixel processado não atingir o fim de uma das imagens

Cada linha do mosaico recebe a linha da imagem esquerda mais a linha da imagem direita subtraída do pedaço de superposição

FIM-ENQ

ENQUANTO pixel processado não atingir o fim da última das imagens

Cada linha do mosaico recebe zeros no lado referente à imagem que já terminou mais a linha da imagem que não acabou

FIM-ENQ

FIM-MÓDULO

3.6.6 - MOSAICO COM CORREÇÃO

Utilizando a abordagem anterior resulta um mosaico com a forma mostrada esquematicamente na Figura 3.5 a, que apresenta o inconveniente das bordas de junção retas e diferenças significativas de tonalidades entre as imagens mosaicadas. Portanto, criou-se um módulo mais refinado para identificar a área de superposição, calcular a média de ambas as imagens na área de superposição e ajustar a tonalidade da imagem da direita para a média da imagem esquerda. Após o ajuste das médias, o módulo cria automaticamente uma linha irregular para junção das imagens, baseado na menor diferença radiométrica local (Equação 2.7). Aqui, acrescentou-se um conceito novo no efeito de rampa para transição das imagens nas proximidades do ponto de junção. Para eliminar eventuais diferenças bruscas de tonalidade que não tenham sido corrigidas pelo ajuste de médias, cada ponto P_i de uma da vizinhança de v pixels (sendo $(v-1)/2$ pixels de cada lado do ponto de junção) será calculado por

$$P_i = \frac{(v-i) \times E_i + i \times D_i}{v} \quad (3.3)$$

onde,

i é um índice relativo que varia de 1 a v , sendo o ponto de junção, o ponto central

P_i é o nível de cinza calculado para o pixel de índice i da vizinhança.

E_i é o nível de cinza do pixel da imagem esquerda de índice i da vizinhança

D_i é o nível de cinza do pixel da imagem direita de índice i da vizinhança

Assim, obtém-se uma média onde os pesos são ponderados, conforme o lado e a distância do ponto de junção

A Figura 3.5 b, mostra de forma esquemática aparência do mosaico com correção radiométrica e fusão das bordas de junção, que deve apresentar tonalidade uniforme, como se fosse uma cena única. Em linhas gerais, o módulo obedece à seguinte lógica.

INÍCIO-MÓDULO

Chamar módulo para AJUSTE_RADIOMÉTRICO

Começar pela imagem mais alta

ENQUANTO pixel processado não atingir a imagem mais baixa

Cada linha do mosaico recebe zeros no lado referente à imagem mais baixa
mais a linha da imagem mais alta

FIM-ENQ

ENQUANTO pixel processado não atingir o final de uma das imagens

ENQUANTO pixel da linha não atingir área de superposição

Linha do mosaico recebe linha da imagem esquerda

FIM-ENQ

Chamar módulo para CÁLCULO_DO_PONTO_DE_JUNÇÃO

ENQUANTO pixel da linha dentro da área de superposição

SE linha não atingiu ponto de junção

Linha do mosaico recebe linha da imagem esquerda

FIM-SE

SE linha passou do ponto de junção

Linha do mosaico recebe linha da imagem direita

FIM-SE

FIM-ENQ

ENQUANTO pixel da linha não atingir o final da linha

Linha do mosaico recebe linha da imagem direita

FIM-ENQ

Chamar módulo para SUAVIZAÇÃO_DA_JUNÇÃO

FIM-ENQ

ENQUANTO pixel processado não atingir o fim da última das imagens

Cada linha do mosaico recebe zeros no lado referente à imagem que já
terminou mais a linha da imagem que não acabou

FIM-ENQ

FIM-MÓDULO

O módulo para AJUSTE_RADIOMÉTRICO tem a forma abaixo

INÍCIO-MÓDULO

Começar pela imagem mais alta

ENQUANTO não atingir a imagem mais baixa

Prosegue leitura

FIM-ENQ

ENQUANTO não atingir o fim de uma das imagens

ENQUANTO linha não atingir área de superposição

Prosegue leitura

FIM-ENQ

ENQUANTO linha dentro da área de superposição

Acumular pixel da imagem esquerda

Acumular pixel da imagem direita

FIM-ENQ

FIM-ENQ

Calcular média da imagem esquerda

Calcular média da imagem direita

Calcular diferença de médias

Ajustar diferença de média a todos os pixels da imagem direita

FIM-MÓDULO

O módulo para CÁLCULO_DO_PONTO_DE_JUNÇÃO tem a forma

INÍCIO-MÓDULO

Receber largura da área de procura K e da máscara w

Começar no início da área de procura

ENQUANTO linha dentro da área de procura

Calcular somatório das diferenças $D_{f(n)}$ para os w pixels vizinhos

Armazenar cada valor $D_{f(n)}$ e a correspondente posição n dentro da linha

FIM-ENQ

Calcular valor $D_{f(n)}$ mínimo

Retornar posição n do valor $D_{f(n)}$ mínimo para o módulo mosaico

FIM-MÓDULO

O módulo para SUAVIZAÇÃO_DA_JUNÇÃO tem a forma

INÍCIO-MÓDULO

VARIANDO i de 1 a v em torno do ponto de junção

$$\text{Nível de cinza do mosaico } P_i = ((v-i)*\text{nível_de_cinza_da_imagem_esquerda} + i*\text{nível_de_cinza_da_imagem_direita})/v$$

FIM-VAR

FIM-MÓDULO

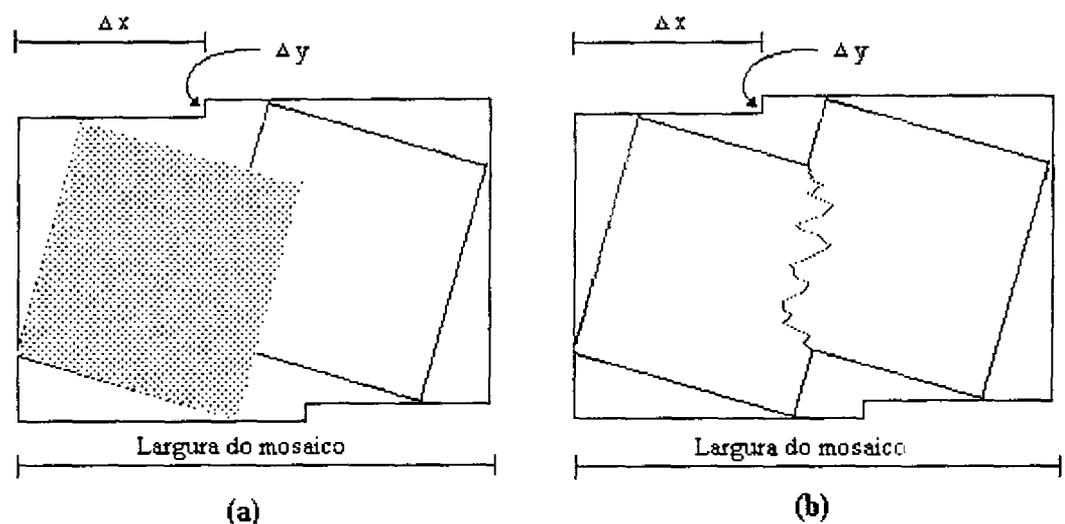


Fig. 3.5 - Porção esquerda (a): mosaico sem correção, porção direita (b): mosaico com correção

O enfoque dado neste trabalho à montagem de mosaicos limitou-se à utilização de apenas duas imagens vizinhas. Para três ou mais imagens vizinhas é suficiente que se façam pequenas adaptações aos algoritmos. No caso da junção das imagens, não haverá grandes dificuldades, sendo suficiente que o programa para cálculo dos coeficientes forneça também dados de registro relativos às demais imagens para que estes, por sua vez, sejam utilizados pelos demais programas para reamostragem e junção. No caso do ajuste de tonalidade, todas as imagens poderão ter suas médias inicialmente ajustadas a uma das imagens que servirá de referência. Outra solução possível é mosaicar as imagens duas a duas de modo que o mosaico resultante das duas primeiras seja uma imagem de entrada para um mosaico com a terceira. Este resultado, por sua vez, será também uma imagem de entrada para um mosaico com a quarta imagem e assim sucessivamente.

3.6.7 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DO MOSAICO

A finalidade deste passo é verificar se o mosaico preserva a precisão geométrica das imagens individuais e atinge o PEC dos mapas nacionais. Os testes devem ser feitos através de uma transformação de similaridade ou isogonal, utilizando um conjunto de Pontos de Controle para cálculo dos coeficientes e outro conjunto para avaliação do RMSE. Esta transformação não introduz deformações, sendo adequada para verificação do grau de similaridade do mosaico final com relação ao mapa e as imagens componentes (Silva et al., 1987).

A formulação matemática para a transformação isogonal é dada por

$$\begin{aligned} X' &= a_0 + a_1 X - b_1 Y \\ Y' &= b_0 + b_1 X + a_1 Y \end{aligned} \quad (3.4)$$

Colocando-se na forma matricial tem-se

$$L = A \cdot B \quad \text{onde}$$

$$L = \begin{matrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X'_n \\ Y'_n \end{matrix} \quad A = \begin{matrix} 1 & X_1 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_n & -Y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n \end{matrix} \quad B = \begin{matrix} a_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ b_0 \\ b_1 \\ a_1 \end{matrix}$$

A solução para os coeficientes é dada por

$$B = (A^T A)^{-1} \cdot A^T L \quad (3.5)$$

3.7 - REMOÇÃO DE NUVENS

As nuvens produzem um efeito estético desagradável, além de suprimirem informações. Em uma imagem TM completa (185 x 185 km), é comum haver alguma cobertura de nuvens degradando a qualidade da imagem.

Assim, foi feito um esforço no sentido de mostrar que a cobertura de nuvens pode ser reduzida através da substituição de dados multitemporais, com base no algoritmo proposto por Hord (1982) e aperfeiçoado por Krug (1992), discutidos na seção 2.7 e submetidos, neste trabalho, a alguns refinamentos adaptativos.

O método utilizado neste trabalho pressupõe que uma das imagens é privilegiada em relação à outra, ou por ter melhor qualidade, por apresentar menor cobertura de nuvens, por ser mais atualizada ou por outro critério especial. A segunda imagem é auxiliar, contribuindo apenas para complementar os dados obstruídos na imagem principal.

Inicialmente, as imagens para remoção de nuvens foram perfeitamente registradas, utilizando os programas apropriados do Apêndice A, em seguida, calculou-se um fator de ajuste de média das imagens (F) numa área sem ocorrência de nuvens, para reduzir diferenças radiométricas e servir de base para identificar nuvens ($F = \mu_A - \mu_B$, onde μ_A e μ_B são a média de brilho da área selecionada nas imagens A e B, respectivamente). Finalmente foi produzida uma terceira imagem, onde cada pixel identificado como nuvem foi substituído pelo valor ajustado da outra imagem. (ver no Apêndice A a listagem completa do programa em linguagem C). Em linhas gerais o procedimento tem a seguinte lógica.

INÍCIO-MÓDULO

Receber valor de decisão dX

Escolher janela para cálculo do fator de ajuste de média

Calcular fator de ajuste de média F

ENQUANTO há pixels na área de trabalho

Dif = |Va - Vb|

SE (Dif - F) > Dx /* pixel de nuvem */

Vc = Vb + F /* substituição do pixel corrigido de F */

SENÃO

$$V_c = V_a \quad /* \text{ pixel sem nuvem} \quad */$$

FIM-SE

FIM-ENQ

FIM-MÓDULO

onde:

- V_c é o valor de cinza da imagem final C, corrigida de nuvens
 V_a é o valor de cinza da imagem principal A
 V_b é o valor de cinza da imagem auxiliar B
 F é um fator de ajuste de média entre as imagens A e B, ($F = \mu_A - \mu_B$ em uma janela selecionada)
 dX é um valor de decisão para a diferença das imagens, a partir do qual o pixel é considerado de nuvem

3.8 - REALCE RADIOMÉTRICO

Esta etapa do método é responsável pela otimização do brilho e contraste, bem como, por refinamentos nos detalhes lineares e bordas nas bandas do mosaico, de forma a atingir a qualidade visual e a concepção cartográfica esperada.

Utilizando o sistema de processamento interativo SITIM e o sistema AEROGRAF, foram testadas e aplicadas algumas transformações lineares, multilineares e não-lineares de contraste em cada banda do mosaico, com o objetivo de atingir um balanço visual adequado.

Foram também avaliadas e aplicadas algumas técnicas de filtragem passa-alta para realce de bordas com objetivo de melhorar a aparência da imagem. Os filtros avaliados foram baseados em adaptações do Laplaciano que é um operador isotrópico tradicionalmente utilizado para estes fins e que se mostrou bastante adequado.

3.9 - REALCES ESPECIAIS

Conforme discutido na seção 2.10 alguns realces localizados podem melhorar sensivelmente a qualidade da imagem, enriquecendo seu potencial de interpretação. Determinadas feições específicas exigem processamentos específicos que poderiam degradar outras feições da imagem. Assim, torna-se necessário fazer a

separação da feição de interesse e utilizar o recurso da máscara para que o processamento se limite aos pixels daquela feição, sem afetar os demais. Neste trabalho foram implementados os dois procedimentos de realce localizado destacados abaixo. Em face de tratar-se feições de alto contraste, a separação e o mascaramento foram feitos por limiarização, utilizando a banda TM4 como controle. Em outros casos é mais eficiente utilizar métodos de classificação.

- 1) Procedimento para atribuir cores mais adequadas para as massas de água. Em algumas aplicações cartográficas é interessante que a água apareça em tons azuis uniformes e bem claros, destacando os limites da costa e o contorno de ilhas, lagos e rios. Em linhas gerais o módulo para este propósito tem a lógica abaixo (ver listagem completa do programa no Apêndice A).

INÍCIO-MÓDULO

Receber valores de atribuição, a, b e c para cada banda

ENQUANTO há pixels na banda de controle

Ler dados das bandas A, B, C e controle

SE $V_{min} < V_{con} < V_{max}$

V_a recebe valor específico a (150 p ex.)

V_b recebe valor específico b (20 p ex.)

V_c recebe valor específico c (15 p ex.)

FIM-SE

FIM-ENQ

FIM-MÓDULO

onde, V_{con} é o valor de cinza da banda de controle, sendo que a banda de controle é aquela em que é mais evidente a discriminação entre as feições de interesse. V_{min} e V_{max} são os valores extremos de cinza que caracterizam a feição a ser realçada. e V_a , V_b e V_c são valores de cinza das bandas A, B e C que formarão a composição colorida.

- 2) Procedimento para filtrar seletivamente somente as regiões de terra firme, mantendo as massas de água inalteradas, tendo em vista que a passagem de um filtro sobre toda a imagem poderá criar padrões indesejáveis na região que contém massas de água.

INÍCIO-MÓDULO

Receber V_{min} e V_{max}

ENQUANTO há pixels na banda de controle

Ler dados da banda A e banda de controle

SE $V_{min} < V_{con} < V_{max}$

V_x recebe pixel da banda A filtrado

SENÃO

V_x recebe pixel da banda A sem filtragem

FIM-SE

FIM-ENQ

FIM-MÓDULO

onde, V_{con} é o valor de cinza da banda de controle, sendo que a banda de controle é aquela em que é mais evidente a discriminação entre as feições de interesse. A banda A é a banda em que se deseja filtrar a feição de interesse. V_{min} e V_{max} são os valores extremos de cinza, na banda de controle, que caracterizam a feição a ser realçada. e V_x é o valor de cinza da banda resultante, filtrada somente nas áreas de terra firme.

3.10 - CORTE PRECISO DO LIMITE ÚTIL

As bordas do mapa na projeção UTM são coincidentes com as transformadas dos paralelos (superior e inferior) e meridianos (direito e esquerdo) sendo, portanto, linhas curvas. Assim, os pixels das bordas devem ser calculados pelas leis da projeção UTM e a todos os pixels fora da área de interesse será atribuído valor zero. Assim, haverá um perfeito casamento com a moldura e outros dados cartográficos que devem ser sobrepostos.

3.11 - SEPARAÇÃO DE CORES

As três bandas espectrais do mosaico digitalmente armazenadas, cobrindo toda a área do mapa devem ser transformadas num reticulado digital cujos padrões devem ter densidades proporcionais aos níveis de cinza. Este processo é conhecido como "Electronic Screening", e é o meio eletrônico equivalente ao processo fotomecânico tradicional. Cada padrão de reticula digital é simplesmente uma versão amostrada e quantizada de um ponto da reticula fotomecânica

(Stoffel e Moreland, 1981). Com o auxílio de um *photoplotter* a laser, cada uma das bandas reticuladas eletronicamente poderá ser gravada em filme fotográfico numa forma chamada meio-tom ("halftone"). Neste processo, apesar do filme fotográfico ser um dispositivo binário que somente registra preto e branco, a imagem parece ter uma grande variedade de tons de cinza de aparência contínua, justamente devido à variação da densidade da área coberta. Resultam então três fotolitos que podem ser copiados diretamente nas chapas litográficas. Cada chapa é associada uma tinta de cor primária e cada uma dessas três chapas é impressa sobre o mesmo papel. A impressão dos pontos em apenas três ou quatro cores cobrindo, cada uma, diferentes densidades de áreas e dispostas em forma microestrutural provocam a ilusão de que o documento foi impresso numa grande quantidade de cores, produzindo a aproximação de uma cena natural. As chapas litográficas permitem a reprodução dos mapas em larga escala, barateando consideravelmente o custo por unidade.

3.12 - PROJETO DE LAY-OUT DA CARTA

Vários elementos cartográficos devem ser sobrepostos ao mosaico com objetivo de enriquecer as informações para apresentação final. Nesta fase estes elementos devem ser planejados e definidos de forma a se integrarem harmoniosamente com o mosaico.

3.13 - SOBREPOSIÇÃO DE TEXTOS E SÍMBOLOS GRÁFICOS

A moldura, a rede de paralelos e meridianos, a grade do sistema de projeção, informações maginais, símbolos, curvas de níveis, sinais gráficos, nomenclatura de estradas, rios, cidades etc, definidos no projeto de lay-out da carta devem ser produzidos digitalmente num arquivo vetorial e gravados em filme no *photoplotter* a laser, formando o quarto fotolito que será associado à cor preta.

3.14 - PREPARO DAS CHAPAS DE IMPRESSÃO

Os fotolitos podem ser copiados diretamente em chapas de impressão litográficas que são associadas a três cores primárias, mais o preto. O documento resultante da impressão das quatro chapas, em quatro diferentes tintas pode ser visualizado numa variedade bastante grande de cores, por um processo subtrativo inerente ao olho humano.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados mais importantes obtidos no decorrer do estudo que possibilitaram extrair as inferências conclusivas substanciais alcançadas ao final do trabalho.

4.1 - ANÁLISE DOS MOSAICOS DIGITAIS

Nas Tabelas 4.1 a 4.4 são apresentados os resíduos e o RMSE das transformações geométricas executadas sobre as imagens para montagem do mosaico. Os dados foram obtidos através do programa CALCULA-COEFICIENTES (ver Apêndice A). No programa e nas Tabelas as coordenadas planas UTM foram subtraídas da constante 500.000 metros, para os valores E e da constante 7.400.000 metros, para valores N, com o objetivo de situar a origem deste sistema mais perto da origem do sistema da imagem. É possível observar nestes resultados que o RMSE, tanto para o cálculo dos coeficientes como para avaliação da transformação é de ordem inferior a um pixel. Estes números estão de acordo com resultados de estudos anteriores, já abordados na seção 2.6.6. e reforçam a teoria sobre a excelente precisão geométrica das imagens TM com correções geométricas de sistema. Não se recomenda, entretanto, que os dados das Tabelas 4.1 a 4.4 sejam utilizados como uma referência sólida para estudos futuros, tendo em vista o tamanho reduzido da área de teste, bem como, a distribuição pouco adequada dos pontos sobre a imagem por falta de feições identificáveis e, também, devido ao o método de aquisição dos pontos de controle, através de cartas, empregado neste trabalho. Como o assunto já foi extensivamente estudado (Welch et al., 1985; Bryant et al. 1985; Borgerson et al. 1985), sugere-se, para este propósito, que sejam vistos os trabalhos originais.

TABELA 4.1 - PONTOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES NA IMAGEM ESQUERDA DO MOSAICO

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	436	256	79663.4	57057.4	-8.78	1.83
2	445	251	79948.0	57177.4	-18.01	12.93
3	440	243	79862.0	57418.5	14.75	-10.19
4	436	236	79749.9	57655.7	-4.81	-2.44
5	442	237	79941.4	57587.7	8.68	-12.48
6	418	271	79072.1	56704.8	8.20	17.68
7	354	135	77675.8	61060.8	-6.62	-20.62
8	346	53	77775.0	63609.2	-2.96	20.13
9	372	114	78325.0	61623.8	9.54	6.84
RMSE E = 10.16 m			RMSE N = 13.44 m		RMSE total = 16.85 m	

TABELA 4.2 - PONTOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO POLINOMIAL NA IMAGEM ESQUERDA DO MOSAICO

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	442	254	79862.0	57104.3	-1.06	15.80
2	442	247	79906.3	57297.3	14.35	-2.10
3	437	240	79780.6	57533.4	11.54	-0.09
4	440	233	79887.2	57710.0	-1.81	-20.47
5	444	241	79975.6	57462.7	-1.82	-8.19
6	431	236	79597.4	57657.4	-6.04	-24.43
7	335	39	77500.9	64033.5	-1.43	-28.89
8	480	79	81746.1	62183.4	7.39	-1.36
RMSE E = 7.42 m			RMSE N = 16.48 m		RMSE total = 18.07 m	

**TABELA 4.3 - PONTOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES
NA IMAGEM DIREITA DO MOSAICO**

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	483	90	92750.3	61883.7	2.45	18.29
2	433	110	91141.6	61529.3	0.39	13.55
3	445	255	90785.6	57101.5	-4.17	-26.85
4	69	332	79073.0	56703.5	4.02	13.68
5	91	314	79814.0	57106.9	-7.16	-11.38
6	93	308	79917.0	57292.5	5.99	5.02
7	89	301	79809.8	57529.8	-14.99	13.60
8	92	298	79942.0	57586.6	11.95	-4.31
9	224	181	84498.2	60447.6	10.75	17.32
10	201	122	84074.7	62266.2	-9.24	-38.92
RMSE E = 8.34 m			RMSE N = 18.97 m		RMSE total = 20.72 m	

**TABELA 4.4 - PONTOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA
TRANSFORMAÇÃO POLINOMIAL NA IMAGEM DIREITA DO MOSAICO**

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	466	101	92173.9	61598.4	-7.52	-23.26
2	408	263	89638.3	57073.2	3.49	0.13
3	260	169	85617.5	60608.6	-15.42	-2.30
4	87	317	79676.7	57053.8	-9.54	4.78
5	96	312	79958.7	57170.0	-23.63	16.26
6	91	304	79870.2	57414.9	-0.66	-2.36
7	90	295	79890.3	57706.5	5.32	15.65
8	95	302	79982.5	57465.4	-18.86	8.22
9	229	181	84649.5	60412.2	10.73	6.15
10	202	106	84205.8	62792.6	12.47	14.35
RMSE E = 12.69 m			RMSE N = 11.81 m		RMSE total = 17.34 m	

A Figura 4.1 mostra uma subimagem de 500 x 500 pixels, banda TM4, extraída do quadrante B, órbita ponto 218/76 e a Figura 4.2 mostra uma subimagem de 500 x 500 pixels, banda TM4, quadrante A, órbita ponto 217/76.

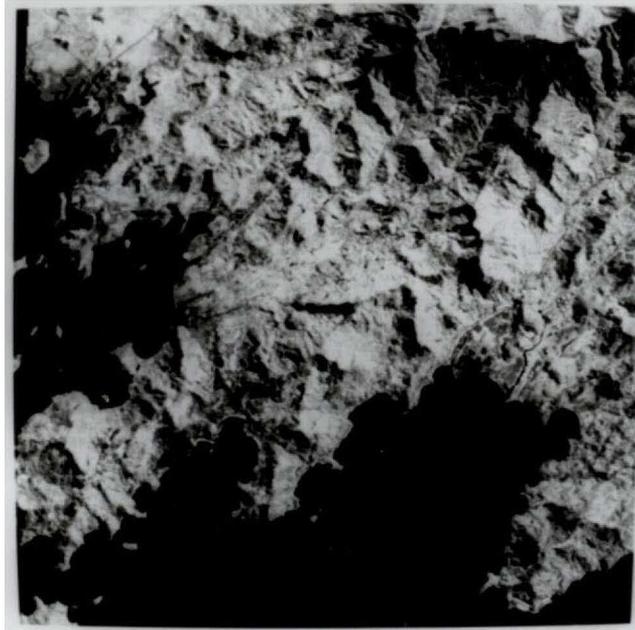


Fig. 4.1 - Subimagem da banda TM4 quadrante B, componente esquerda do mosaico.

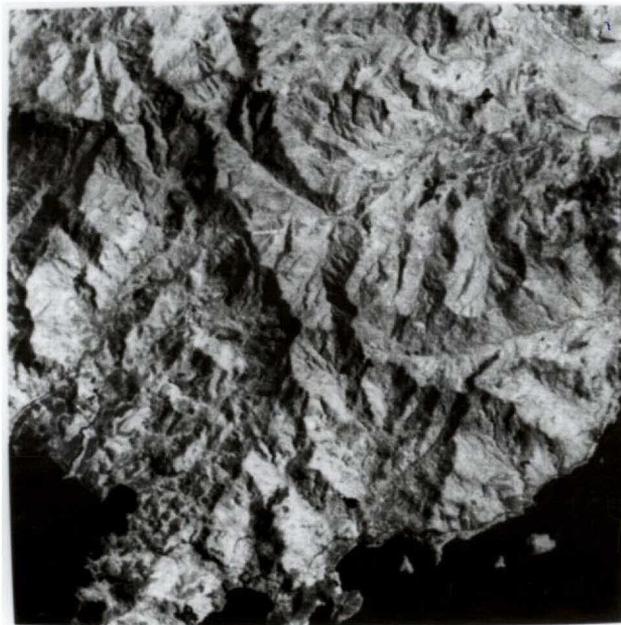


Fig. 4.2 - Subimagem da banda TM4 quadrante A, componente direita do mosaico.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram o resultado das duas imagens anteriores registradas e reamostradas através do programa REAMOSTRAGEM (ver Apêndice A). A imagem da Figura 4.3 tem 582 colunas x 583 linhas e a imagem da Figura 4.4 tem 585 colunas x 585 linhas



Fig. 4.3 - Subimagem da Figura 4.1 reamostrada (componente esquerda do mosaico).

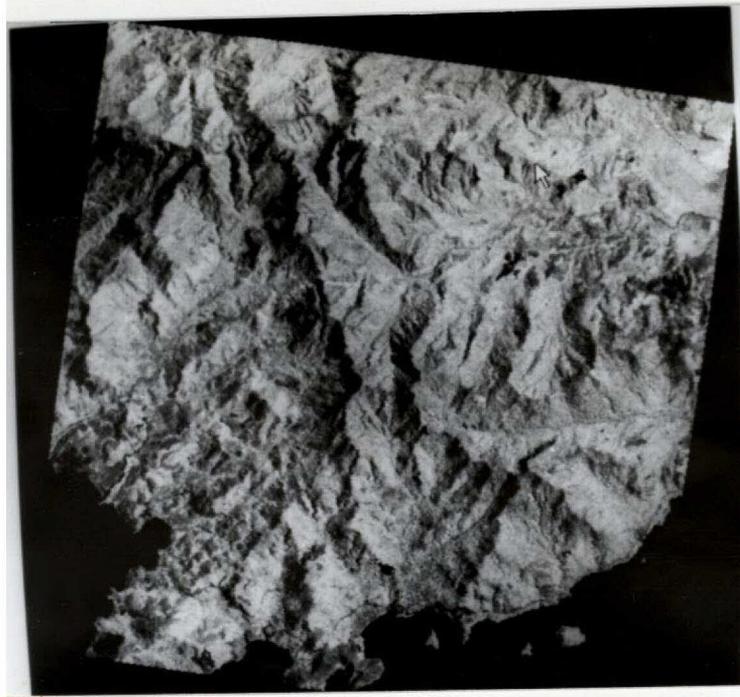


Fig. 4.4 - Subimagem da Figura 4.2 reamostrada (componente direita do mosaico).

A Figura 4.5 é um mosaico da banda TM4, de 946 colunas x 587 linhas, sem correção obtido a partir das duas subimagens das Figuras 4.3 e 4.4, utilizando o programa MOSAICO-SEM-CORREÇÃO (ver Apêndice A). Observa-se que as diferenças radiométricas são significativamente grandes e a linha reta de junção entre as imagens é notória, tornando-se um resultado muito pobre para fins práticos.

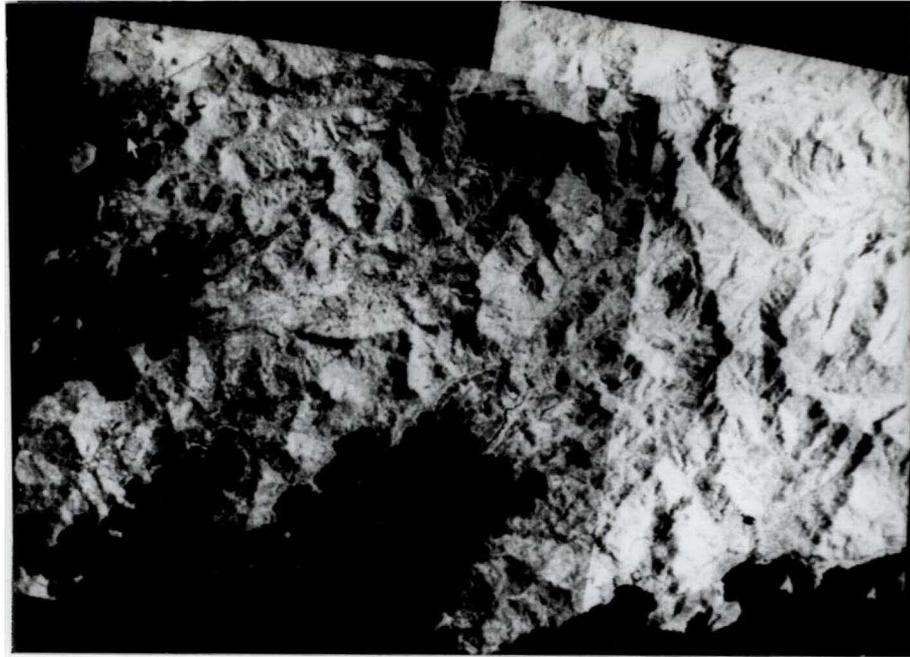


Fig. 4.5 - Mosaico da banda TM4, sem correção.

A Figura 4.6 apresenta um mosaico de dimensões semelhantes ao anterior a partir das mesmas subimagens das Figuras 4.1 e 4.2. Neste caso porém, a média radiométrica da imagem direita foi ajustada para a média da imagem esquerda, utilizando como base a região de superposição entre as duas imagens. Aplicou-se também uma linha de junção irregular para as duas imagens com base na menor diferença radiométrica local, $Df_{(n)}$, definida na Equação 2.7. Neste caso a região de pesquisa definida por K foi fixada em 200 pixels e a máscara de integração w que percorre a extensão K teve sua largura fixada em 50 pixels. Utilizou-se aqui o programa MOSAICO-COM-CORREÇÃO (ver Apêndice A). Observa-se que em face da ampla largura de K , em busca da posição n de menor diferença radiométrica para cada linha, surgiram bordas horizontais significativas, mostrando-se, ainda, ser um resultado inadequado para aplicações práticas. A Figura 4.7 apresenta uma ampliação por interpolação linear de um trecho do mosaico na região de junção, onde se pode ver com mais clareza as bordas horizontais que prejudicam sensivelmente a qualidade do mosaico.



Fig. 4.6 - Mosaico da banda TM4, com correção apresentando bordas horizontais.

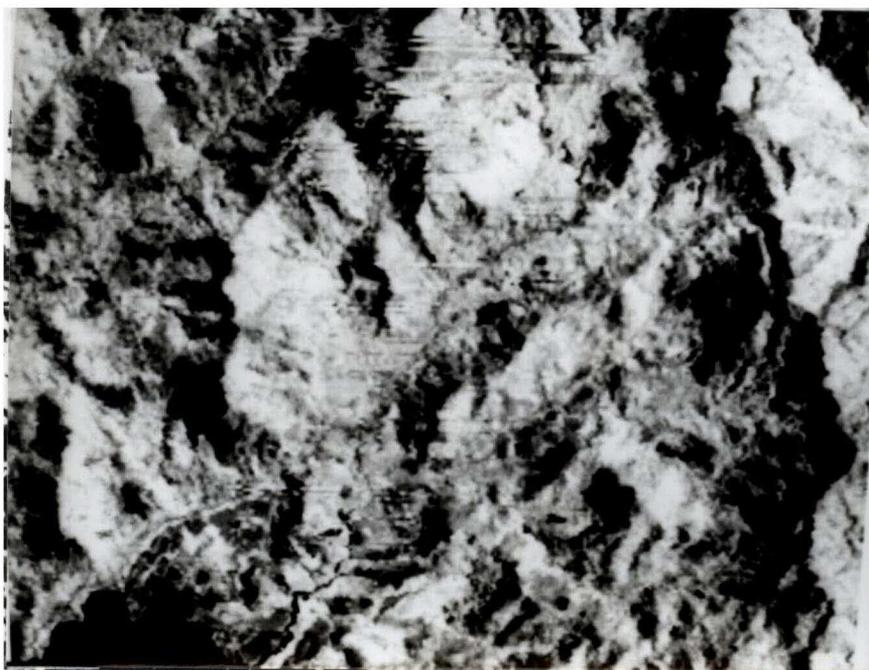


Fig. 4.7 - Detalhe ampliado do mosaico da Figura 4.6 na área de junção.

Um excelente resultado, que é apresentado na Figura 4.8, foi obtido utilizando os mesmos passos do paragrafo anterior, porém reduzindo sensivelmente a largura da região de pesquisa ($K = 40$ pixels) e o tamanho da máscara de integração ($w = 10$ pixels). Uma boa forma de se chegar a resultados satisfatórios é fazer testes interativos variando estes dois parâmetros. Considerando que o ajuste radiométrico é feito com base em todos os pixels da região de superposição e havendo um bom registro entre as imagens, valores baixos para K e w produzem resultados satisfatórios. Vários testes realizados neste trabalho mostraram que valores para K de 10 a 70 e w de 5 a 20 produziram os melhores resultados. Em alguns casos favoráveis, devido ao bom nível de correções radiométricas básicas das imagens TM-Landsat-5 realizados em Cachoeira Paulista, pode-se até prescindir da aplicação da linha irregular para junção das imagens, sendo suficiente o ajuste das médias.



Fig. 4.8 - Mosaico da banda TM4, com correção apresentando ótimos resultados.

O mosaico final foi avaliado através de uma transformação isogonal (Equação 3.4) e apresentou bons resultados, os quais podem ser visualizados nas Tabelas 4.5 e 4.6. O RMSE de 17 metros, resultante da avaliação mostra que o mosaico conserva uma qualidade geométrica compatível com as imagens componentes e se mantém dentro do PEC dos mapas nacionais para escalas menores que 1:100.000. A escala de 1:100.000

permite um um RMSE de até 50 metros (0.5 mm x 100.000). Visualmente não se consegue identificar discontinuidades no mosaico, mesmo nas regiões costeiras e ilhas onde os detalhes são precisos e muito bem definidos. A Figura 4.9 apresenta uma ampliação por interpolação linear de um trecho do mosaico na região de junção onde se pode ver com mais clareza a excelente qualidade da junção. A Figura 4.10 mostra a composição colorida de três bandas do mosaico (RGB 5, 4, 3) e a Figura 4.11 mostra a mesma composição com as três bandas submetidas a um filtro passa-alta, através do programa FILTRO-NÃO-SELETIVO (ver Apêndice A), com máscara 3x3 de pesos de acordo com a Figura 4.12.

TABELA 4.5 - PONTOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES NA AVALIAÇÃO DO MOSAICO FINAL

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	458	343	79038.2	56704.7	7.34	-8.18
2	627	156	84102.8	62271.7	-19.13	13.10
3	631	139	84257.0	62797.0	13.07	-2.82
4	860	182	91121.7	61490.7	14.73	-13.61
5	915	170	92752.9	61837.8	-5.08	-7.39
6	813	322	89669.7	57264.5	-10.87	19.33
RMSE E = 12.59 m			RMSE N = 11.97 m		RMSE total = 17.37 m	

TABELA 4.6 - PONTOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO MOSAICO FINAL

Ponto	Coluna	Linha	UTM E	UTM N	Erro em E	Erro em N
1	477	311	79578.4	57657.8	-26.15	-3.81
2	639	218	84476.0	60442.9	1.59	-19.05
3	677	213	85612.9	60581.7	-1.80	-12.44
4	897	179	92210.1	61569.9	-6.94	-7.26
5	850	329	90797.1	57080.6	7.66	-11.15
6	489	328	79951.6	57158.8	-10.81	-16.11
RMSE E = 12.34 m			RMSE N = 12.71 m		RMSE total = 17.71 m	

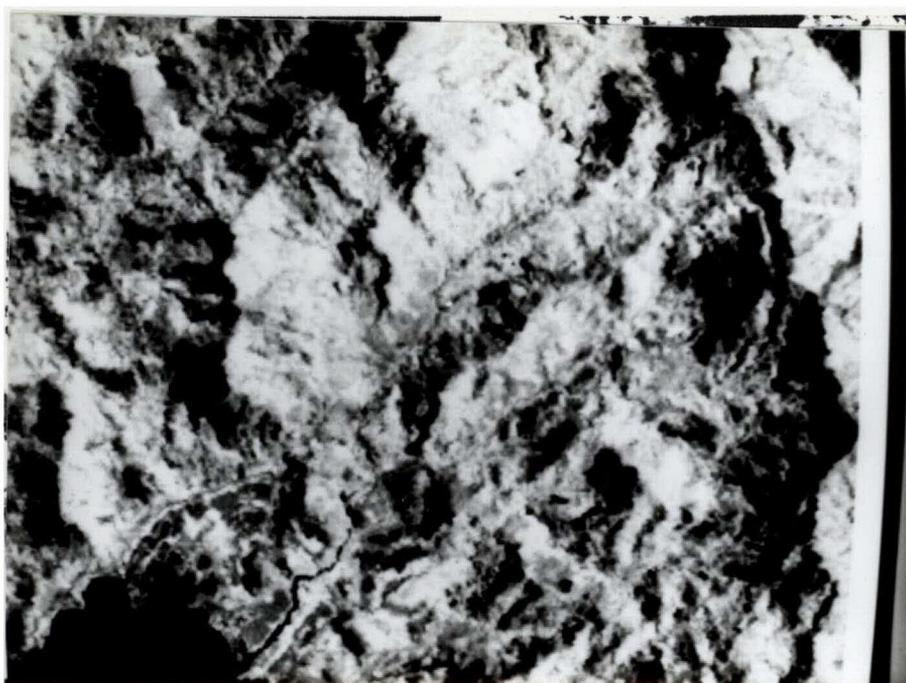


Fig. 4.9 - Detalhe ampliado do mosaico da Figura 4.8 na área de junção.

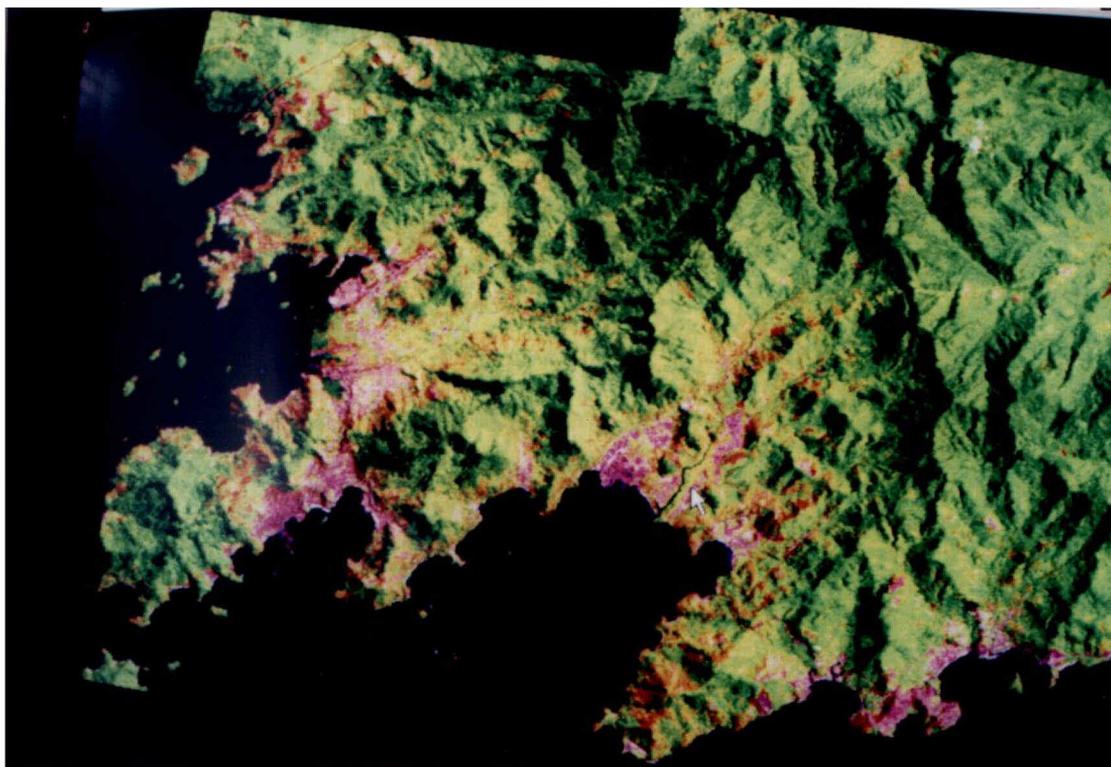


Fig. 4.10 - Composição colorida RGB de três bandas (5,4,3) do mosaico.

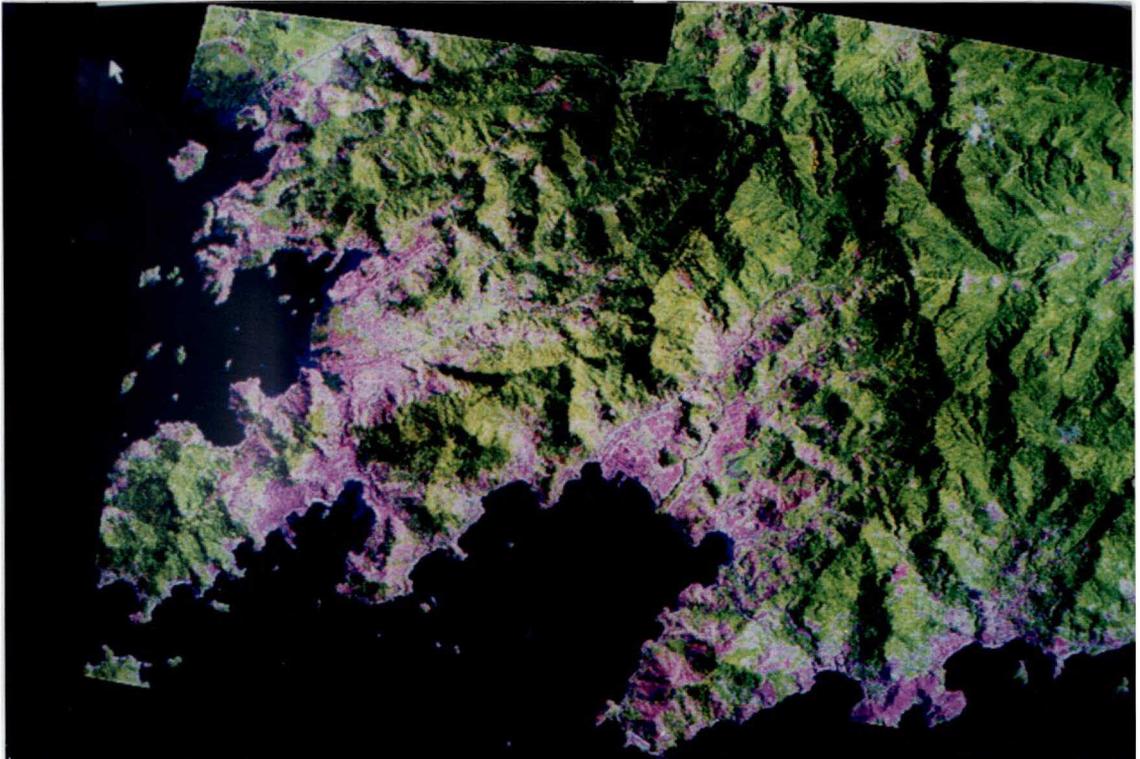


Fig. 4.11 - Composição colorida RGB, com as três bandas do mosaico submetidas a um filtro passa-alta.

0	-1	0
-1	6	-1
0	-1	0

Fig 4.12 - Máscara utilizada na filtragem das bandas do mosaico

Fazendo uma análise geral dos mosaicos obtidos, considerando que a região em estudo é de relevo movimentado e que as imagens foram obtidas em diferentes estações do ano é muito provável que melhores resultados possam ser atingidos em regiões planas e utilizando imagens da mesma estação do ano, onde há menor ocorrência de sombras topográficas, os deslocamentos de relevo são desprezíveis e a

tonalidade radiométrica das imagens é mais uniforme. Assim as descontinuidades iniciais a serem corrigidas serão sensivelmente menores.

4.2 - RESULTADOS ALCANÇADOS NA REMOÇÃO DE NUVENS

A abordagem metodológica para remover nuvens utilizada neste trabalho, pressupõe que uma das imagens é privilegiada: ou por ter melhor qualidade; menor cobertura de nuvens; por ser mais atualizada ou por outro critério qualquer, e a segunda imagem é auxiliar, contribuindo apenas para complementar os dados obstruídos na imagem principal. A análise das Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostra que, os resultados não podem ser considerados excelentes, principalmente com relação à sombra da nuvem projetada no terreno, bem como, no que se refere às áreas de transição pouco definidas entre as nuvens e o terreno. Entretanto comprova-se que a estética da imagem pode ser significativamente melhorada, com o emprego do algoritmo proposto para remoção de nuvens. Na Figura 4.13 tem-se um trecho de imagem da banda TM3, de 650 x 650 pixels, com cobertura de nuvens, principalmente nos cantos superiores da imagem. Para efeito da aplicação da correção de nuvens esta imagem será considerada principal. Na Figura 4.14 é mostrado o mesmo trecho de uma imagem também da banda TM3, contendo nuvens distribuídas em espaços diferentes. Neste caso, as nuvens concentram-se na parte de baixo e à esquerda, tendo também uma nuvem isolada no centro. Esta imagem será considerada auxiliar. A Figura 4.15 é a imagem resultante da aplicação do programa CORREÇÃO-DE-NUVENS, (ver Apêndice A). Nesta Figura observa-se que os trechos sem cobertura de nuvens da imagem principal foram mantidos e os trechos obstruídos por nuvens foram substituídos a partir da imagem auxiliar. O trecho marcado com um retângulo (50 x 50 pixels) foi utilizado para fazer o ajuste radiométrico entre as duas imagens. Os melhores resultados podem ser obtidos variando interativamente o tamanho e a posição da janela de ajuste radiométrico e escolhendo um valor de decisão (dX) adequado, a partir do qual se considera o pixel como nuvem (neste caso, utilizou-se $dX = 5$). A Figura 4.16 mostra a composição colorida (RGB 5, 4, 3) das imagens brutas e a Figura 4.17 mostra a mesma composição após a correção de nuvens ser aplicada nas três bandas.

A remoção das sombras de nuvens é um problema complicado, em face da sua difícil identificação por processos automáticos. Quando for importante removê-las é possível utilizar técnicas de mosaicagem, com princípios similares àqueles abordados na seção 3.6

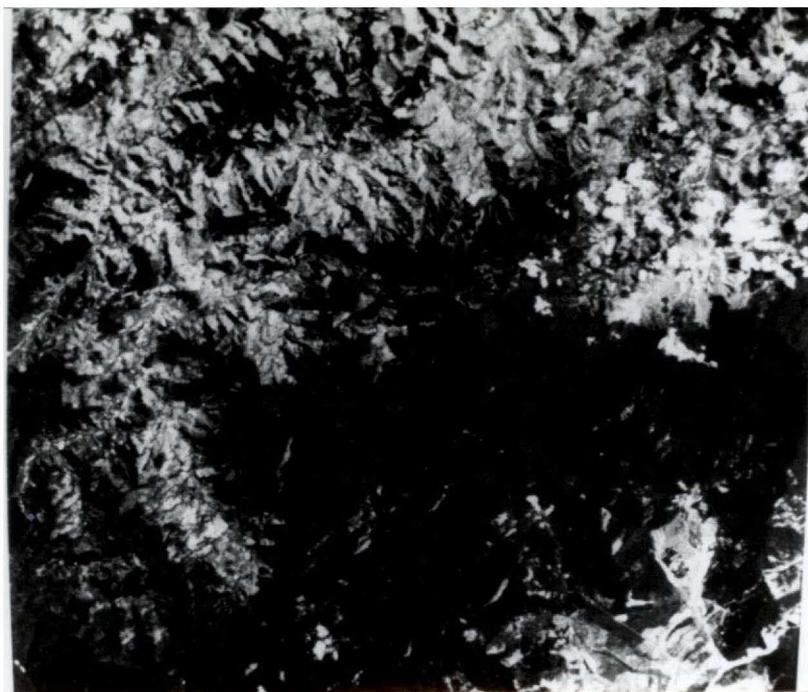


Fig. 4.13 - Imagem da banda TM3 com presença de nuvens.

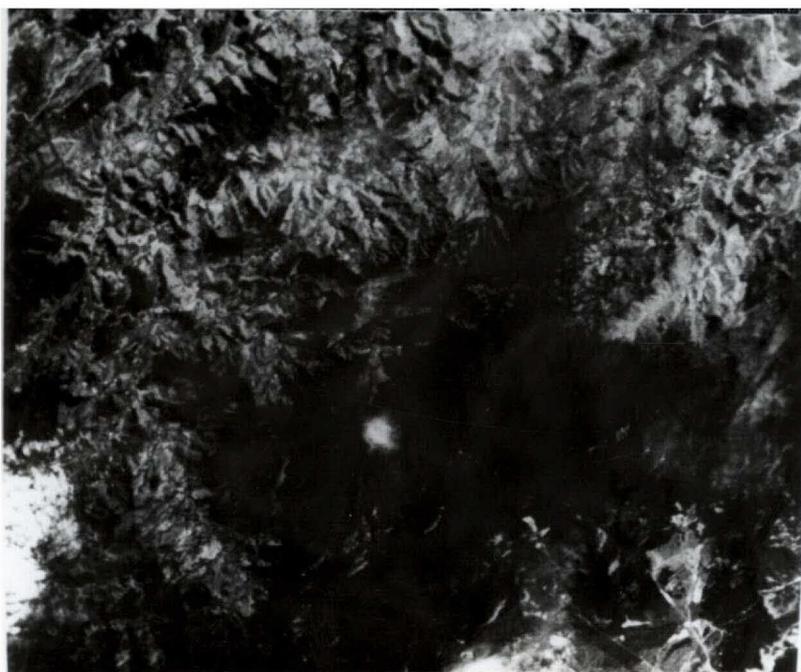


Fig. 4.14 - Imagem da banda TM3 com nuvens em áreas diferentes da anterior.

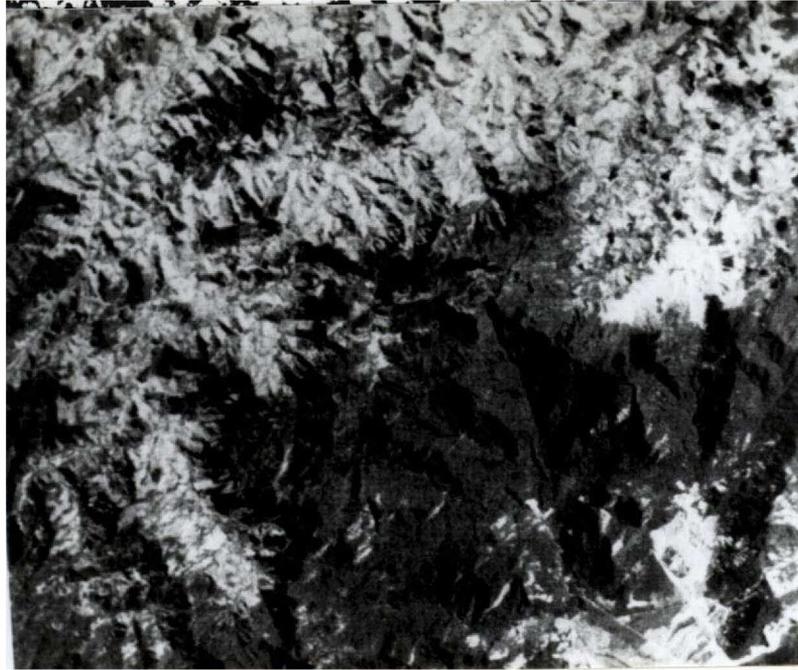


Fig. 4.15 - Imagem da banda TM3 corrigida da presença de nuvens.

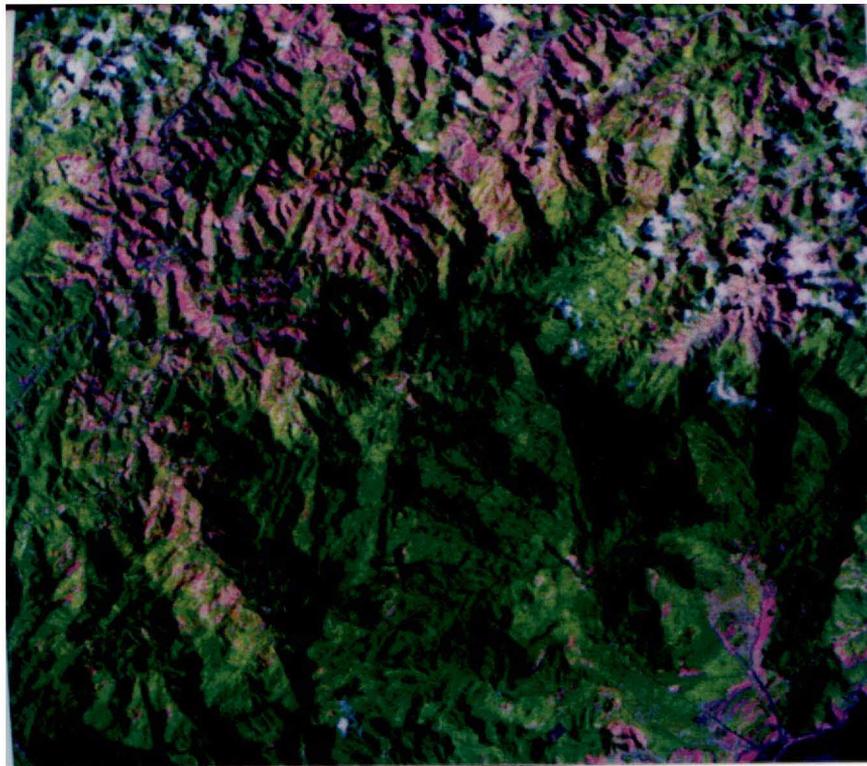


Fig. 4.16 - Composição colorida (RGB 5,4,3) das imagens com nuvens.

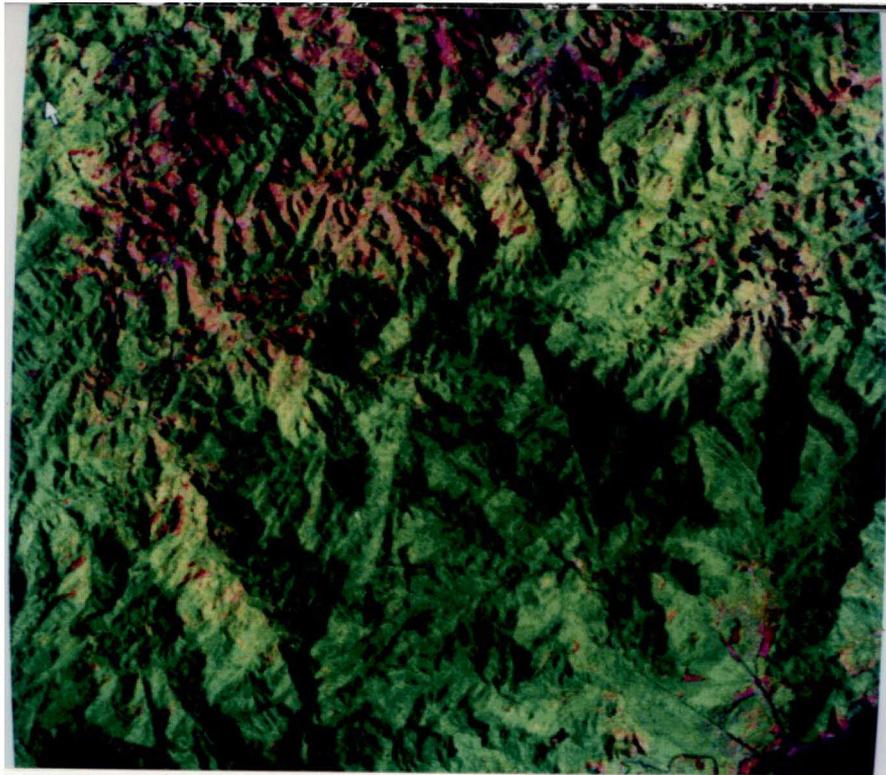


Fig. 4.17 - Composição colorida (RGB 5, 4, 3) das imagens corrigidas da presença de nuvens.

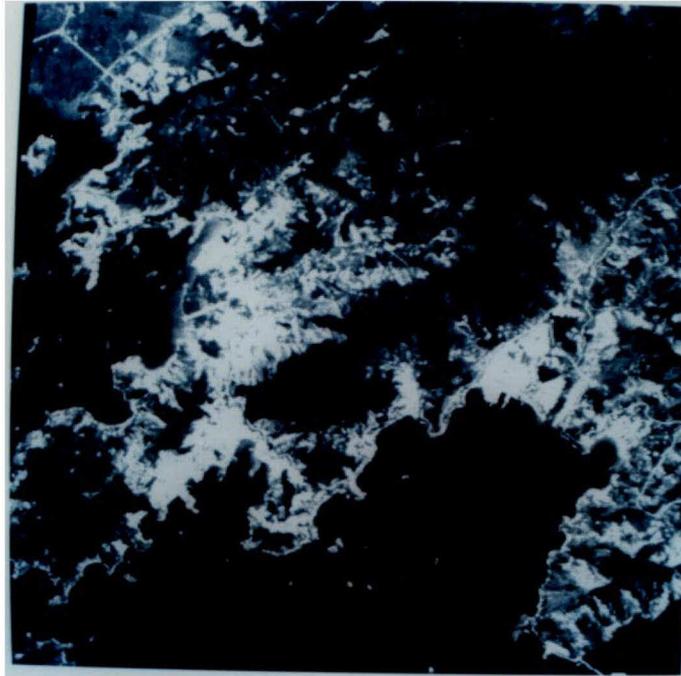
4.3 - RESULTADOS NA APLICAÇÃO DE REALCES ESPECIAIS

Neste trabalho a aplicação de realces especiais ficou restrita a apenas dois procedimentos: atribuição de cor e filtragem seletiva. Mesmo assim, este tipo de processamento apresentou resultados que mostraram tratar-se de um campo bastante promissor nas aplicações de imagens destinadas a mapeamento.

4.3.1 - ATRIBUIÇÃO DE COR

As próximas Figuras mostram os resultados da aplicação do algoritmo discutido na seção 3.9, implementado através do programa ATRIBUIÇÃO-DE-COR (ver Apêndice A) e representa uma pequena amostra do que pode ser feito através de realces especiais. Toda a massa d'água da banda TM3 mostrada na Figura 4.18, sem limites definidos e cuja tonalidade pode confundir-se com vegetação, teve seus níveis de cinza alterados para um valor mais alto, utilizando a banda TM4 como máscara de separação. A todos os pixels com valores de 1 a 9 (identificados como água) na banda TM4 atribuiu-se o valor 126 na banda TM3. O resultado pode ser visto

na Figura 4.19, onde os limites da água, antes confusos, ficaram, agora, muito bem definidos e a tonalidade diferente da vegetação. A Figura 4.20 mostra a composição colorida (RGB 5,4,3) com o realce de atribuição de cor. O resultado pode ser comparado com a Figura 4.10 (composição colorida do mosaico), onde se pode notar o destaque que foi dado à linha de costa e ao contorno das ilhas. A base para um bom resultado neste tipo de processamento consiste em escolher os níveis de cinza adequados para a feição desejada, em cada banda, de forma a traduzir a cor adequada na composição.



x

Fig. 4.18 - Banda TM3, sem limites bem definidos entre terra firme e massas de água.



Fig. 4.19 - Banda TM3, com limites bem definidos entre terra firme e massas de água.

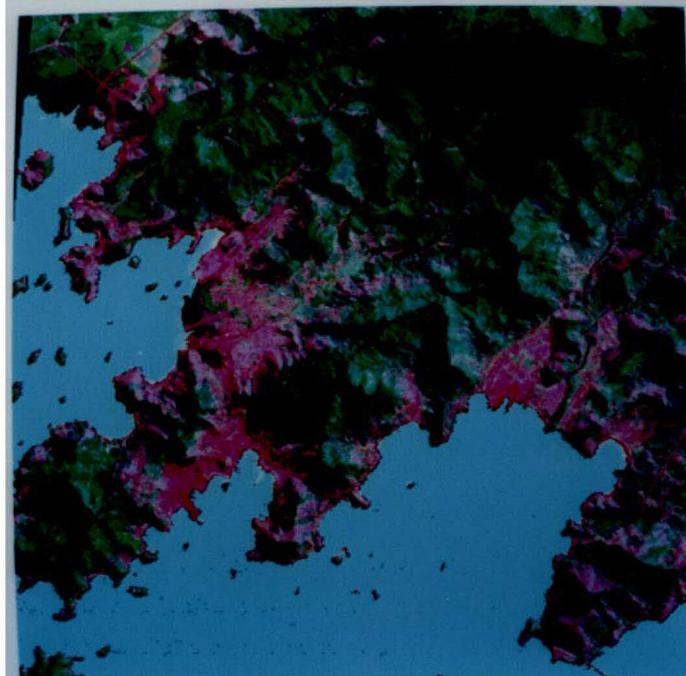


Fig. 4.20 - Composição colorida RGB, bandas 5, 4 e 3, com atribuição de cor para a água.

4.3.2 FILTRAGEM SELETIVA

A Figura 4.21 mostra a imagem já apresentada na Figura 4.18, submetida a um filtro passa-alta, com a máscara da Figura 4.12, através do programa FILTRO-NÃO-SELETIVO (ver Apêndice A), e a Figura 4.22 apresenta a imagem da Figura 4.18, onde foram filtradas apenas as regiões de terra firme, deixando-se a água inalterada, utilizando o programa FILTRO-SELETIVO (ver Apêndice A). Observa-se que o filtro não seletivo, aplicado indiscriminadamente sobre toda a imagem, produziu um bom resultado na região de terra firme, porém, introduziu padrões indesejáveis (ruídos) na água, mostrando que o mesmo filtro não é apropriado para ambas as feições. A Figura 4.22 mostra que, separando a feição que se deseja realçar deixando as demais inalteradas, o resultado é bem superior. Este resultado simples mostra que o assunto pode ser bastante explorado para destacar feições específicas e produzir imagens de qualidade visual elevada.

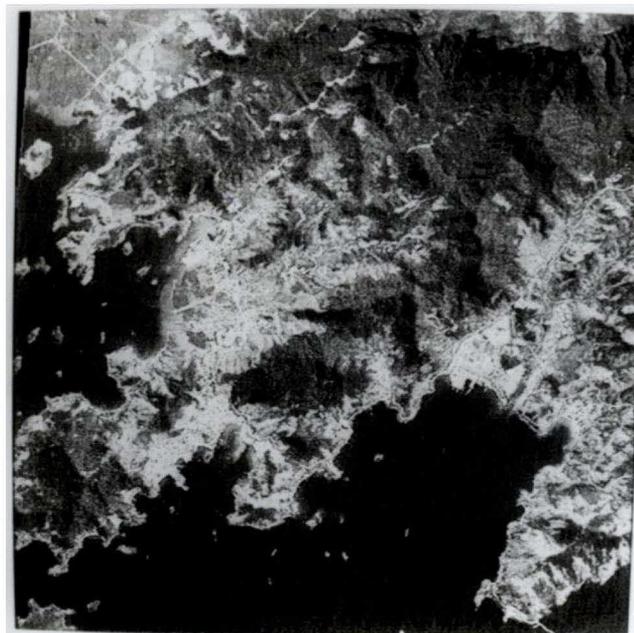


Fig. 4.21 - Banda TM3, com aplicação de um filtro passa-alta não seletivo.

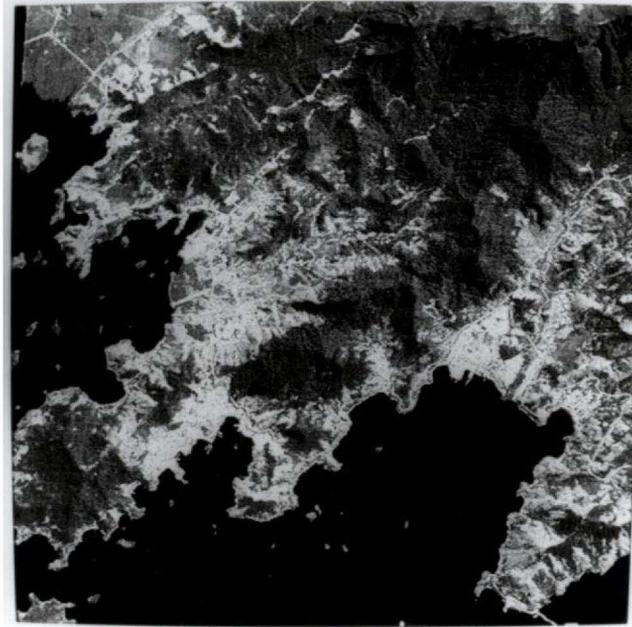


Fig. 4.22 - Banda TM3, com aplicação de um filtro passa-alta seletivo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados apresentados no Capítulo 4 evidenciam-se alguns aspectos importantes, que podem ser sintetizadas através das seguintes inferências conclusivas.

- 1) A utilização de imagens TM com correção geométrica de sistema (fitas CCT-PT) para mosaicagem, com registro feito através de polinômios de primeiro grau é compatível com escalas de 1:100.000 e menores, ratificando resultados anteriores (Welch et al., 1985; Bryant et al. 1985; Borgerson et al. 1985).
- 2) Mosaicos de imagens TM de órbitas vizinhas, sem um prévio ajuste da tonalidade radiométrica entre elas, não apresentam resultados satisfatórios. Em algumas regiões as discontinuidades provocadas pelas diferenças de tonalidade são tão marcantes que podem surgir dúvidas de que as imagens sejam contíguas.
- 3) Mosaicos de imagens TM de órbitas vizinhas, utilizando ajuste radiométrico com base na totalidade da área de superposição entre elas, acrescido do processo de junção através de uma linha irregular e complementado com o processo de suavização de eventuais diferenças na vizinhança da junção, produzem excelentes resultados, desde que se mantenha um controle adequado sobre a largura da faixa estabelecida para cálculo dos pontos de junção.
- 4) A cobertura útil das imagens originais, inicialmente bloqueadas por nuvens, foi significativamente aumentada e o aspecto visual da imagem melhorado, utilizando algoritmos simples e imagens multitemporais para substituir os dados nas regiões cobertas por nuvens.
- 5) Técnicas de realces especiais, utilizando separação e mascaramento de feições, seguidas de atribuição de cores e/ou filtragem seletiva, melhoraram a qualidade visual das feições de interesse, sem produzir degradação marginal nas demais feições, contribuindo para enriquecer a qualidade visual e aumentar o potencial de interpretação.

- 6) A operacionalização de uma metodologia digital para produção de Carta-Imagem nos moldes propostos neste estudo poderá trazer significativos benefícios à qualidade visual e cartográfica da Carta-Imagem produzida em nosso país.

- 7) Em se tratando de aplicações não convencionais, as técnicas propostas neste trabalho, feitos os ajustes necessários, poderão ter uma utilização vantajosa em outras áreas do conhecimento, como a medicina e a odontologia. Por exemplo, várias pequenas radiografias dentárias digitalizadas poderiam ser mosaicadas para fornecer uma visão panorâmica da boca.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa objeto deste trabalho não esgota o assunto sobre a matéria que é, de fato, muito vasta. Os métodos, procedimentos, conceitos e tópicos discutidos e analisados, foram o resultado da leitura, compilação e síntese de diversas fontes da literatura científica especializada em sensoriamento remoto e mapeamento. Estes estudos preliminares foram complementados com os conhecimentos adquiridos no curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto do INPE e conduzidos pela experiência da orientação acadêmica, de forma que alcançaram os objetivos inicialmente propostos.

Cabe observar que, no Brasil, a pesquisa em sensoriamento remoto para aplicações em mapeamento, particularmente através de Carta-Imagem, é um assunto pouco explorado e carente de estudos adicionais. Portanto, os resultados deste trabalho visam representar uma pequena contribuição para as atividades de produção digital de mapas e, principalmente, fornecer um ponto de partida para futuros estudos.

Em face de ser um campo de estudos bastante abrangente, envolvendo diversos ramos do sensoriamento remoto e de outras ciências, alguns tópicos foram tratados dentro de um enfoque menos profundo do que realmente mereciam. Também, devido à limitação de tempo, recursos computacionais e equipamentos de campo que restringiram significativamente as dimensões da área de trabalho, alguns dos resultados da pesquisa podem, eventualmente, não refletir a realidade para aplicações no mapeamento por Carta-Imagem para toda a extensão do país. Entretanto, considera-se que ficaram bem estabelecidas as linhas mestras de uma metodologia a ser seguida para o aperfeiçoamento da produção de Carta-Imagem no Brasil. Os algoritmos e programas desenvolvidos no decorrer da pesquisa, para mosaicagem digital remoção de nuvens e realces especiais, já podem ser um ponto de inicial para aplicações práticas, devendo ser adaptados e/ou aperfeiçoados segundo as necessidades específicas.

Espera-se que este trabalho venha a constituir-se num ponto de partida para abordagens mais específicas em futuras pesquisas. Sugere-se um estudo mais aprofundado sobre as melhores combinações de bandas abrangendo amostras das principais regiões características de todo o território nacional, inclusive definindo-se

técnicas e emprego de produtos de níveis de processamento mais elevados, como bandas adicionadas, divididas, filtradas, contrastadas, etc.

Também, será de grande contribuição um estudo detalhado sobre filtragens seletivas onde seriam utilizados métodos de classificação eficientes para separação de feições de interesse e onde seriam feitos estudos para definir os melhores filtros para cada feição específica, permitindo a geração de produtos visuais de alto nível.

Espera-se também, que estes estudos utilizando produtos de níveis superiores sejam, em breve, concluídos, integrados e direcionados para o estabelecimento de uma linha inteiramente digital de produção de Carta-Imagem, permitindo que este método de mapeamento venha a ser maciçamente utilizado, para levantar, inventariar, explorar e preservar os recursos naturais e produzidos pelo homem, atividades indispensáveis ao desenvolvimento de qualquer nação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, A.T. A short note on the production of satellite image maps for Sudan. **ITC Journal**, (1):1-2, Jan. 1991.
- Barbosa, M.N.; Serra, P.R.M. The brazilian experience on mapping from satellite data. In: International Congress of ISPRS, Commission IV, 16., Kioto, 1988. **Proceedings**. Kioto, ISPRS, 1988. v. 27, B4, p. 22-28.
- Barbosa, O. C. **Correção geométrica de imagens SPOT com uso de um modelo digital de elevação**. (Dissertação de Mestrado) - INPE. São José dos Campos, INPE, Fev. 1990. 111 p. (INPE-5014-TDL/401).
- Bernstein, R. Image geometry and rectification. In: Colwell, R.N. ed **The manual of remote sensing**. 2. ed. Falls Church, VA, ASPRS, 1983. v. 1, cap. 21, p. 875-881.
- Binnie, D.R.; Colvocoresses, A.P. The Denali image map. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 53(3):307-310, Mar. 1987.
- Borgerson, W.T.; Batson, R.M.; Kieffer H.H. Geometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(12):1893-1898, Dec. 1985.
- Brownworth F.S.; Rohde W.G. Recent developments in the U.S. Geological Survey's Landsat image mapping program. In: ASPRS-ACSM Fall Convention, Anchorage, Alaska, Sept. 28-Oct. 3, 1986. **Proceedings**. Falls Church, VA, ASPRS, 1986, p. 12-18.
- Bryant, N.A.; Zobrist, A.L.; Walker, R.E.; Gokhman, B. An analysis of Landsat Thematic Mapper P-Product internal geometry and conformity to earth surface geometry. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(9):1435-1447, Sept. 1985.
- Chavez, P.S.; Guphill, S.C.; Bowell, J.A. Image processing techniques for Thematic Mapper data. In: ASPRS-ACMS Annual Meeting, Washington, DC, Mar. 11-16, 1984. **Proceedings**. Falls Church, VA, ASPRS, 1984, v. 2, p. 757-769.

- Colvocoresses, A.P. Space Oblique Mercator. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 40(8):921-926, Aug. 1974.
- Colvocoresses, A.P. Image mapping with the Thematic Mapper. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(9):1499-1505, Sept. 1986.
- Clark, B.P. Landsat Thematic Mapper data production: a history of bulk image processing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 56(4):447-451, 1990.
- d'Alge, J.C.L. Qualidade geométrica das imagens TM do Landsat-5. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Brasília, 1987. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Cartografia, 1987. p. 44-59.
- Dixon-Gough, R.W. Concerning the reproduction of photomaps of satellite imagery. In: **Annual Conference of Remote Sensing Society**, 9., London, Dec 16-18, 1981. England, Whitstable Litho, 1981. p. 233-249.
- Figueiredo, D.C. **Sistema de obtenção de índice de vegetação para a América do Sul por processamento digital de imagens NOAA/AVHRR**. (Dissertação de Mestrado) - INPE. São José dos Campos, INPE, 1990. (INPE-5068-TDL/407)
- Galvão, W.S. **Avaliação de técnicas de seleção de bandas multiespectrais visando a discriminação de rochas carbonáticas**. (Dissertação de Mestrado) - INPE. São José dos Campos, INPE, 1989. 286 p. (INPE-4850-TDL/365)
- Hood, J.; Ladner, L.; Champion, R. Image processing techniques for digital orthophotoquad production. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(9):1323-1329, 1989.
- Hord, R. M. **Digital image processing of remotely sensed data**. New York, N. Y., Academic, 1982. 256 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa índice do mapeamento geral do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- Jensen, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986. 379 p.

- Kahler, M.; Milkus, I. Berlin from space: a digitally produced satellite image map. In: ISPRS and Remote Sensing Society, Edinburg, Scotland, 1986. **Proceedings**. England, Whitstable Litho, 1986. v. 26, p. 4, p. 85-92, 1986.
- Krug, T. **Statistical approaches to the estimation of missing values arising in remotely sensed data**. (Doctoral Thesis) - England, University of Sheffield, Feb 1992. 350 p.
- Lillesand, T.M.; Lo, T.H.C. The Wisconsin experimental program for satellite image mapping using Thematic Mapper data. In: ASPRS-ACMS Fall Convention. Indianapolis, Sep 8-Oct 13, 1985. **Proceedings**. Falls Church, VA, ASPRS, 1985. p. 757-769.
- Milgram, D.L. Computer methods for creating photomosaics. **IEEE Transactions on Computers**, 24(11):1113-1119, Nov. 1975.
- Milgram, D.L. Adaptive techniques for photomosaicking. **IEEE Transactions on Computers**, 26(11):1175-1180, Nov. 1977.
- Miller, S.H. A digital mosaicking algorithm Allowing for an irregular join line. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(1):43-47, Jan. 1989.
- Moik, J.G. **Digital processing of remotely sensed images**. Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1980. 330 p. (NASA SP-431).
- Neter, J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models**. Georgetown, Ontario, 1974. 842 p.
- Ramey, B.S. U.S. Geological Survey National Mapping Program: digital mapmaking procedures for the 1990s. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 58(8):1113-1116, Aug. 1992.
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Berlin, Springer-Verlag, 1986. 281 p.
- Richardus, P.; Adler R.K. **Map projections for geodesists, cartographers and geographers**. Netherlands, North-Holland, 1972. 174 p.

- Robinson, A.H.; Sale, R.; Morrison, J. **Elements of cartography**. New York, John Wiley & Sons, 1978.
- Roessel, J.W.; Godoy, R.C. Star mosaics for Project RADAM. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 40(5):583-595, May 1974.
- Santos, A.C. **Simulação de imagens de sensores com largo campo de visada a partir de imagens de sensores com menor campo de visada**. (Dissertação de Mestrado) - INPE. São José dos Campos, INPE, 1992. 125 p. (INPE-5378-TDI/473)
- Schowengerdt, R.A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Orlando, FL, Academic, 1983. 249 p.
- Serra, P. R. M. **Geração de imagens TM Landsat em fitas compatíveis com o computador geometricamente corrigidas**. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Brasília, 1987. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Cartografia, 1987, p. 94-104.
- Sheffield, C. Selecting band combinations from multispectral data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(6):681-687, Jun. 1984.
- Shiren, Y.; Li, L.; Peng, G. Two dimensional seam-point searching in digital image mosaicking. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(1):49-53, Jan. 1989.
- Silva, A. J. F. M.; Mello, E. M. K.; d'Alge, J. C. L.; Peralta, M. F.; Aguiar, S. G.; Lima, S. P. B. G. R. Procedimentos para avaliação da qualidade geométrica de produtos orbitais analógicos processados no Instituto de Pesquisas Espaciais. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Brasília, 1987. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Cartografia, 1987, p. 105-132.
- Snyder, J.P. Forum: Comparison of map projections for Landsat image maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(3):379-380, Mar. 1986.
- Souza, R. C. M. **INPE Landsat Thematic Mapper computer compatible tape format specification**. São José dos Campos, INPE, 1992. 61 p. (INPE-2553-PRE/207).

- Stoffel, J.C.; Moreland, J. F. A survey of electronic techniques for pictorial image reproduction. **IEEE Transactions on Communications**, 29(12):1898-1924, Dec. 1981.
- Thormodsgard, J.M.; Lillesand, T. Comparison of the gridded finite element and the polynomial interpolations for geometric rectification and mosaicking of Landsat data. In: ASPRS-ACSM Annual Convention. Baltimore, MD, Mar. 29-Apr. 3, 1987. **Proceedings**. Falls Church, VA, ASPRS-ACSM. 1987, v. 2, p. 139-151.
- Welch, R.; Jordan, T.R.; Ehlers, M. Comparative evaluations of geodetic accuracy and cartographic potential of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper image data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(9):1249-1262, Sept. 1985.
- Zobrist, A.L.; Bryant, N.A.; McLeod, R.G. Technology for large digital mosaics of Landsat data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 49(9):1325-1335, Sept. 1983.

APÊNDICE APROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM C

```

/*****/
/* Programa: CALCULA-COEFICIENTES
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Programa para cálculo do vetor de coeficientes de transformação (b)
/* para mosaicagem de duas imagens. Baseado em regressão polinomial do
/* primeiro grau, método de resolução por matrizes  $B=inv(AT.A).(AT.L)$ .
/* B= vetor dos coeficientes de      A=matriz dos pontos homólogos
/*   transformação entre os         L=vetor dos pontos de referência
/*   sistemas imagem e mapa
/*****/

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

#define LIN 30      /* Máximo de pontos de controle *****/
#define COL 6      /* Colunas da matriz p/ polinômio grau 1 */

long double mdet6(long double *,int);      /* protótipos */
long double mdet5(long double *,int);      /* protótipos */
void mmul(long double *,long double *, int, int, int, long double *);
void mdif(long double *,long double *, int, int, long double *);
void mtran(long double *, int, int, long double *); /* protótipos */
void minv(long double *, int, long double *); /* protótipos */
void mpr(long double *, int, int);          /* *****/

long double l[LIN]={0},ab_l[LIN]={0},at[COL*LIN]={0}, a[LIN*COL]={0};
long double ata[COL*COL]={0},atl[COL]={0},b[COL]={0},iata[COL*COL]={0};
long double ab[LIN]={0};

void main(void)
{
    FILE *fptr, *fptw;
    char n_arq[15];

```

```

double pte, ptn, ptc, ptlin, troca, emqx, emqy;
double emq, emqx2=0., emqy2=0.;
int i,j,k,m=0,ct=0,p;
fptw = fopen("coef.dat","wt"); /* Arquivo de saída dos coeficientes */
for(i=0; i<2; i++) { /* Uma iteração para cada imagem */
    printf("\nNome do arquivo de pontos de controle s/ext.: ");
    scanf("%s",n_arq);
    strcat(n_arq, ".i");
    for(j=0; j<2; j++) { /* Uma iteração para cada vetor coef */
        fptr = fopen(n_arq, "rt");
        /* Montagem da matriz A (pts homólogos) e matriz L (referência)*/
        ct=0;
        while((fscanf(fptr, "%lf%lf%lf%lf", &pte, &ptn, &ptc, &ptlin))!=EOF)
        {
            if(j==1) { /* inversão dos pontos */
                troca=pte; pte=ptc; ptc=troca; /* homólogos<-->pontos */
                troca=ptn; ptn=ptlin; ptlin=troca; /* de referência na */
            } /* segunda iteração */
            printf("%0.2lf %0.2lf %0.2lf %0.2lf\n", pte, ptn, ptc, ptlin);
            *(a+ct*COL+0) = *(a+(ct+1)*COL+3) = 1.; /* monta */
            *(a+ct*COL+1) = *(a+(ct+1)*COL+4) = pte; /* matriz */
            *(a+ct*COL+2) = *(a+(ct+1)*COL+5) = ptn; /* A */
            *(l+ct) = ptc;
            *(l+ct+1) = ptlin;
            printf("%lf ", pte);
            printf("%lf ", *(a+ct*COL+0));
            printf("%lf\n", ptn);
            ct=ct+2;
        }
        fclose(fptr);
        mpr(a, ct, COL);
        mtran(a, ct, COL, at);
        mpr(at, COL, ct);
        mmul(at, l, COL, ct, l, atl);
        mpr(atl, COL, 1);
    }
}

```

```

mmul(ata,a,COL,ct,COL,ata);
mpr(ata,COL,COL);
printf("\n\n\tAguarde.....\n");
minv(ata,COL,iata);
mpr(iata,COL,COL);
mmul(iata,atl,COL,COL,1,b);
for(k=0; k<COL; k++)      /* grava arquivo de */
    fprintf(fptw,"%Lf ",*(b+k)); /* coeficientes */
mpr(b,COL,1);
/*Cálculo dos resíduos (V=L-AB) e EMQ */
printf("\n\n\tAguarde.....\n");
mmul(a,b,ct,COL,1,ab);
mpr(ab,ct,1);
mdif(1,ab,ct,1,ab_1);
mpr(ab_1,ct,1);          /* Impressão da matriz dos erros */
emqx2=emqy2=0.;
for(m=0; m<ct-1; m=m+2)
    emqx2 = emqx2 + pow(*(ab_1+m),2.);
emqx = sqrt(emqx2/ct/2.);
for(m=1; m<ct; m=m+2)
    emqy2 = emqy2 + pow(*(ab_1+m),2.);
emqy = sqrt(emqy2/ct/2.);
emq = sqrt(emqx2/ct/2.+emqy2/ct/2.);
printf("\ni=%d EMQX= %.3f EMQY= %.3f EMQ= %.3f\n",i,emqx,emqy,emq);
}
}
fcloseall();
}
/* Função cálculo da transposta de uma matriz */
void mtran(long double *ma, int lm, int cm, long double *mat)
{
    int i,j;
    for(i=0; i<cm; i++)
        for(j=0; j<lm; j++)
            *(mat+i*lm+j) = *(ma+j*cm+i);
}

```

```

}
/* Função multiplicação de matrizes */
void mmul(long double *ma1, long double *ma2, int lm1, int cm1,
          int cm2, long double *mp)
{
    int i,j,k;
    long double aux;
    for(k=0; k<lm1; k++)
        for(i=0; i<cm2; i++) {
            aux=0;
            for(j=0; j<cm1; j++)
                aux = aux + (long double)*(ma1+k*cm1+j)*
                    (long double)*(ma2+j*cm2+i);
            *(mp+k*cm2+i) = aux;
        }
}

/* Função diferença de matrizes */
void mdif(long double *ma1, long double *ma2, int lm,
          int cm, long double *md)
{
    int i,j;
    for(i=0; i<lm; i++)
        for(j=0; j<cm; j++)
            *(md+i*cm+j) = *(ma1+i*cm+j) - *(ma2+i*cm+j);
}

/* Função para impressão de uma matriz */
void mpr(long double *mat, int lm, int cm)
{
    int i,j;
    printf("\n\t IMPRESSÃO DA MATRIZ \n\n");
    for(i=0; i<lm; i++) {
        for(j=0; j<cm; j++)
            printf("%Lf ", *(mat+i*cm+j));
        printf("\n");
    }
}

```

```

printf("\n");
i=getch();
}
/* Função para cálculo do determinante de uma matriz 6x6 */
long double mdet6(long double *mat, int tm)
{
    long double det=0;
    int i[COL],c=0,j,k,p;
    for(i[0]=0; i[0]<tm; i[0]++) {
        for(i[1]=0; i[1]<tm; i[1]++) {
            while(i[1]==i[0]) i[1]=i[1]+1;
            for(i[2]=0; i[2]<tm; i[2]++) {
                while(i[2]==i[0]||i[2]==i[1]) i[2]=i[2]+1;
                for(i[3]=0; i[3]<tm; i[3]++) {
                    while(i[3]==i[0]||i[3]==i[1]||i[3]==i[2]) i[3]=i[3]+1;
                    for(i[4]=0; i[4]<tm; i[4]++) {
                        while(i[4]==i[0]||i[4]==i[1]||i[4]==i[2]||i[4]==i[3])
                            i[4]=i[4]+1;
                        for(i[5]=0; i[5]<tm; i[5]++) {
                            while(i[5]==i[0]||i[5]==i[1]||i[5]==i[2]||
                                i[5]==i[3]||i[5]==i[4]) i[5]=i[5]+1;
                            if(!(i[1]>=COL||i[2]>=COL||i[3]>=COL||i[4]>=COL||
                                i[5]>=COL)) {
                                c=0;
                                for(j=0; j<COL-1; j++)
                                    for(k=j+1; k<COL; k++)
                                        if(i[j]>i[k]) c++;
                                det=det+pow(-1.,(double)c)*(*(mat+i[0]))*
                                    (*(mat+6+i[1]))*(*(mat+12+i[2]))*
                                    (*(mat+18+i[3]))*(*(mat+24+i[4]))*
                                    (*(mat+30+i[5]));
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    }
    }
    return(det);
}
/* Função para cálculo do determinante de uma matriz 5x5 */
long double mdet5(long double *mat, int tm)
{
    long double det=0;
    int i[COL-1],c=0,j,k;
    for(i[0]=0; i[0]<tm; i[0]++) {
        for(i[1]=0; i[1]<tm; i[1]++) {
            while(i[1]==i[0]) i[1]=i[1]+1;
            for(i[2]=0; i[2]<tm; i[2]++) {
                while(i[2]==i[0]||i[2]==i[1]) i[2]=i[2]+1;
                for(i[3]=0; i[3]<tm; i[3]++) {
                    while(i[3]==i[0]||i[3]==i[1]||i[3]==i[2]) i[3]=i[3]+1;
                    for(i[4]=0; i[4]<tm; i[4]++) {
                        while(i[4]==i[0]||i[4]==i[1]||i[4]==i[2]||i[4]==i[3])
                            i[4]=i[4]+1;
                        if(!(i[1]>=5||i[2]>=5||i[3]>=5||i[4]>=5)) {
                            c=0;
                            for(j=0; j<COL-2; j++)
                                for(k=j+1; k<COL-1; k++)
                                    if(i[j]>i[k]) c++;
                            det=det+pow(-1.,(double)c)*(long double)*(mat+i[0])*
                                (long double)*(mat+5+i[1])*
                                (long double)*(mat+10+i[2])*
                                (long double)*(mat+15+i[3])*
                                (long double)*(mat+20+i[4]));
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    return(det);
}
/* Função para cálculo da inversa de uma matriz 6x6*/
void minv(long double *mat, int tm, long double *miv)
{
    long double cof[COL*COL]={0}, cf[(COL-1)*(COL-1)]=0;
    int h,i,j,k,col,ind;
    for(h=0; h<tm; h++) {
        for(i=0; i<tm; i++) {
            ind=0;
            for(j=0; j<tm; j++)
                for(k=0; k<tm; k++)
                    if(j!=h && k!=i) {
                        *(cf+ind)=*(mat+j*tm+k);
                        ind=ind+1;
                    }
            *(cof+h*tm+i) = pow(-1.,(double)(h+i))*mdet5(cf,COL-1);
        }
    }
    for(i=0; i<tm; i++)
        for(j=0; j<tm; j++)
            *(miv+i*tm+j) = (*(cof+j*tm+i))/mdet6(mat,COL);
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/* programa: REAMOSTRAGEM
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Faz interpolação por vizinho mais próximo. sistema da Imagem para sistema do Mapa
/*****/
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>

```

```

#define MAXMEM 40000
#define PLX 30      /*modificar para 30, 10, etc. TM, SPOT, etc. */
void trc(double , double , double *, double *, double *);
void mpr(double *, int, int);
unsigned char *nc, *ncf;
double b[6*4]={0};
void main(void)
{
    FILE *fptc; /*Arquivo dos coeficientes de transf. */
    FILE *fpti; /*Arquivo imagem bruta de entrada */
    FILE *fpto; /*Arquivo imagem corrigida de saída */
    FILE *fpts; /*Arquivo de registro */
    char arq1[20],arqs[20];
    double nc1[2],nc2[2],nc3[2],nc4[2],ec1[2],ec2[2],ec3[2],ec4[2];
    double ns,es;
    long int ni,ei,Emin[2],Nmin[2],Emax[2],Nmax[2],resto;
    int i,j,k,l,li,co,m,n,h,i1,j1,blocos,cof[2],lif[2],LinC,p,min,max;
    int BL,sftE,sftN,Emos,Nmos,ad;
    fptc = fopen("coef.dat","rt"); /* arq coeficientes */
    for(i1=0; i1<4; i1++)
        for(j1=0; j1<6; j1++)
            fscanf(fptc,"%lf", (b+i1*6+j1)); /* carga do arq de coef. */
    mpr(b,4,6);
    for(m=0; m<2; m++)
        { printf("\nNome da imagem %d s/ ext., linhas, colunas: ",m+1);
          scanf("%s%d%d",arq1, &li, &co);
          for(i=0;i<20; i++) arqs[i] = arq1[i];
          strncpy(arqs, arq1, 2); arqs[2]='\0';
          strcat(arq1, ".i");
          strcat(arqs, "_r.i");
          fpti = fopen(arq1,"rb"); /* arq imagem bruta */
          fpto = fopen(arqs,"wb"); /* arq imagem corrigida */
          trc(0.,0.,ec1+m,nc1+m,b+6+12*m); /* cálculo */
          trc(0.,li,ec2+m,nc2+m,b+6+12*m); /* das coordenadas UTM/REF */
          trc(co,li,ec3+m,nc3+m,b+6+12*m); /* dos cantos da imagem */
        }
}

```

```

trc(co,0.,ec4+m,nc4+m,b+6+12*m); /* bruta */
LinC=((nc1[m]-nc3[m])/PIX) + 0.5;
cof[m]=(ec4[m]-ec2[m])/PIX;
BL=MAXMEM/cof[m];
blocos=(float)LinC/BL;
printf("\nAguarde processar %d blocos\n",blocos);
resto=LinC%BL;
ad=(BL*40)/100;
nc=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)(BL+ad)*(long)co));
if(nc==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
ncf=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)BL*(long)cof[m]));
if(ncf==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
printf("\nCantos da imagem bruta\n");
printf("\n%4d %4d %10.2lf %10.2lf",0,0,ec1[m],nc1[m]);
printf("\n%4d %4d %10.2lf %10.2lf",0,li,ec2[m],nc2[m]);
printf("\n%4d %4d %10.2lf %10.2lf",co,li,ec3[m],nc3[m]);
printf("\n%4d %4d %10.2lf %10.2lf\n",co,0,ec4[m],nc4[m]);
trc(ec1[m],nc1[m],&es,&ns,b+12*m);
printf("\n%7.2lf %7.2lf\n",es,ns);
trc(ec2[m],nc2[m],&es,&ns,b+12*m);
printf("\n%7.2lf %7.2lf\n",es,ns);
trc(ec3[m],nc3[m],&es,&ns,b+12*m);
printf("\n%7.2lf %7.2lf\n",es,ns);
trc(ec4[m],nc4[m],&es,&ns,b+12*m);
printf("\n%7.2lf %7.2lf\n",es,ns);
Emin[m]=ec2[m] +0.5;
Nmin[m]=nc3[m] +0.5;
Emax[m]=ec4[m] +0.5;
Nmax[m]=nc1[m] +0.5;

```

```

ni=nc1[m] + 0.5;          /* N máximo */
for(h=0; h<blocos; h++) {
    if(h>0) fseek(fpti,(long)co*(BL*h-ad/2),0);
    fread(nc,co*(long)(BL+ad),1,fpti);
    printf("\n%d",h);
    for(i=0; (i<BL); i++)
        { ei=ec2[m] + 0.5;          /* E mínimo */
          for(j=0; (j<cof[m]); j++) {
              trc(ei,ni,&es,&ns,b+12*m);
              es=(int)es;
              ns=(int)ns;
              if(ns>=0&&ns<li&&es>=0&&es<co) {
                  if(h>0) ns=ns-(h*BL-ad/2);
                  if(ns<0) {
                      fseek(fpti,(long)co*(ns+(h*BL-ad/2))+es,0);
                      fread((ncf+i*cof[m]+j),1,1,fpti);
                  }
                  else
                      *(ncf+i*cof[m]+j) = *(nc+(int)ns*co+(int)es);
              }
              else
                  *(ncf+i*cof[m]+j) = 0;
              ei=ei+PIX;
          }
          ni=ni-PIX;
        }
    fwrite(ncf,cof[m]*BL,1,fpti);
}
free(nc); free(ncf);
nc=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)(resto+ad)*(long)co));
if(nc==NULL) {
    puts("\nMemória insuficiente");
    exit(1);
}
ncf=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)(resto)*(long)cof[m]));

```

```

if(ncf==NULL) {
    puts("\nMemória insuficiente ncf");
    exit(1);
}
if(h>0) fseek(fpti,(long)co*(BL*h-ad/2),0);
fread(nc,co*(long)(BL+ad),1,fpti);
for(i=0; (i<resto); i++) {
    printf("\n%d",i);
    ei=ec2[m] + 0.5;          /* E mínimo */
    for(j=0; (j<cof[m]); j++) {
        trc(ei,ni,&es,&ns,b+12*m);
        es=(int)es;
        ns=(int)ns;
        if(ns>=0&&ns<li&&es>=0&&es<co) {
            if(h>0) ns=ns-(h*BL-ad/2);
            if(ns<0) {
                fseek(fpti,(long)co*(ns+(h*BL-ad/2))+es,0);
                fread((ncf+i*cof[m]+j),1,1,fpti);
            }
            else
                *(ncf+i*cof[m]+j) = *(nc+(int)ns*co+(int)es);
        }
        else
            *(ncf+i*cof[m]+j) = 0;
        ei=ei+PIX;
    }
    ni=ni-PIX;
}
fwrite(ncf,cof[m]*resto,1,fpto);
free(nc); free(ncf);
lif[m]=h*BL+resto;
printf("\nImagem %d final: %d linhas, %d colunas",m+1,lif[m],cof[m]);
p=getch();
}
sfE=(Emin[1]-Emin[0])/PIX + 0.5;

```

```

sftN=(Nmax[1]-Nmax[0])/PIX + 0.5;
Emos=(Emax[1]-Emin[0])/PIX + 0.5;
min=Nmin[0];
max=Nmax[0];
if(Nmin[1]<Nmin[0]) min=Nmin[1];
if(Nmax[1]>Nmax[0]) max=Nmax[1];
Nmos=(max-min)/PIX + 0.5;
fpts = fopen("shift.dat","wt"); /* arq registro */
fprintf(fpts, "%d %d %d %d", sftE, sftN, Emos, Nmos);
fprintf(fpts, " %d %d %d %d", lif[0], cof[0], lif[1], cof[1]);
p=getch();
fcloseall();
}
/*Função para transformação de coordenadas */
void trc(double e, double n, double *es, double *ns, double *pb)
{
    *es= *pb + *(pb+1)*e + *(pb+2)*n +0.5;
    *ns= *(pb+3) + *(pb+4)*e + *(pb+5)*n +0.5;
}
/*Função para impressão de uma matriz */
void mpr(double *mat, int lm, int cm)
{
    int i,j;
    printf("\n\tIMPRESSÃO DA MATRIZ \n\n");
    for(i=0; i<lm; i++) {
        for(j=0; j<cm; j++)
            printf("%0.8f ", *(mat+i*cm+j));
        printf("\n");
    }
    printf("\n");
    i=getch();
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

```

```

/*****/
/* programa: MOSAICO-SEM-CORREÇÃO
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Mosaica duas imagens sem correção. Faz apenas a colagem das imagens, sem correção
/* radiométrica nem o disfarce da linha de junção
/*****/

#include <stdlib.h>
#include <alloc.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#define MAXMEM 64000
unsigned char *nc1, *nc2, *ncf, nci;
double b[6*4]={0};
void main(void)
{
    FILE *fpt1; /*Arquivo imagem1 */
    FILE *fpt2; /*Arquivo imagem2 */
    FILE *fptrn; /*Arquivo mosaico */
    FILE *fpts; /*Arquivo de registro */
    char arq1[20],arq2[20],arqs[20];
    long int u,resto;
    int sftE,sftN,Emos,Nmos,i,j,j1,k,li1,co1,li2,co2,p,lin,blk,bl=0;
    fpts = fopen("shift.dat","rt"); /* arq registro */
    fscanf(fpts,"%d %d %d %d",&sftE,&sftN,&Emos,&Nmos);
    fscanf(fpts,"%d %d %d %d",&li1,&co1,&li2,&co2); /*carga do arq */
    printf("\n%d %d %d %d\n",sftE,sftN,Emos,Nmos);
    printf("\n%d %d %d %d\n",li1,co1,li2,co2);
    printf("\nNome da imagem1 s/ extensão: ");
    scanf("%s",arq1);
    printf("\nNome da imagem2 s/ extensão: ");
    scanf("%s",arq2);
    for(i=0;i<20; i++) arqs[i] = arq1[i];
    strcat(arq1, ".i");
    strcat(arq2, ".i");
}

```

```

strcpy(arqs, arq1, 2); arqs[2]='\0';
strcat(arqs, "_m.i");
fpt1 = fopen(arq1,"rb");      /* arq imagem1 */
fpt2 = fopen(arq2,"rb");      /* arq imagem2 */
fptm = fopen(arqs,"wb");      /* arq imagem mosaico */
if(sftN<0) {                  /* imagem esquerda mais alta */
    sftN = -1*sftN;
    for(i=0; i<sftN; i++) {
        for(j=0; j<co1; j++) {
            nci = getc(fpt1);
            putc(nci,fptm);
        }
        for(j=co1; j<Emos; j++)
            putc(0,fptm);
    }
}
else {                        /* imagem direita mais alta */
    for(i=0; i<sftN; i++) {
        for(j=0; j<Emos-co2; j++)
            putc(0,fptm);
        for(j=Emos-co2,j1=0; j<Emos; j++,j1++) {
            nci = getc(fpt2);
            putc(nci,fptm);
        }
    }
}
printf("\n%d %d %d ",sftN*Emos,sftN,Emos);
bl = MAXMEM/Emos;
blk=(Nmos-sftN)/bl;
resto=(Nmos-sftN)%bl;
if(resto != 0) blk=blk+1;
nc1=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)bl*(long)co1));
if(nc1==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}

```

```

}
nc2=(unsigned char *)malloc(((long)bl*(long)co2));
if(nc2==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
ncf=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)bl*(long)Emos));
if(ncf==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
for(k=0; k<blk; k++) {
    printf("\n%d",k);
    printf("\n %d",fread(nc2,1,(unsigned)((long)bl*co2),fpt2));
    printf("\n %d",fread(nc1,1,(unsigned)((long)bl*co1),fpt1));
    for(i=0; i<bl; i++) {
        for(j=0; j<Emos-co2; j++)
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
        for(j=Emos-co2,j1=0; j<co1; j++,j1++)
            if((*nc1+i*co1+j)!=0)||(*nc2+i*co2+j1==0)
                *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
        else
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
        for(j=co1,j1=(co1+co2-Emos); j<Emos; j++,j1++)
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
    }
    for (u=0; u< (long)bl*co1; u++)
        *(nc1+u) = 0;
    for (u=0; u< (long)bl*co2; u++)
        *(nc2+u) = 0;
    printf("\n %d",fwrite(ncf,Emos*bl,1,fptm));
}
free(nc1); free(nc2); free(ncf);
printf("\nMosaico final: %d linhas ",blk*bl+sftN);
printf(" %d colunas",Emos);

```

```

    p=getch();
    fcloseall();
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/* programa: MOSAICO-COM-CORREÇÃO
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Mosaica duas imagens com ajuste radiométrico, junção através de uma linha irregular
/* e suavização da vizinhança da junção
/*****/
#include <stdlib.h>
#include <alloc.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#define MAXMEM 40000
void ajmed(float, char *, int, int);      /*protótipos*/
int pjun(int, int, int, int, int, int);  /*protótipos*/
unsigned char *nc1, *nc2, *ncf, nci;
double b[6*4]={0};
void main(void)
{
    FILE *fpt1; /*Arquivo imagem esq. */
    FILE *fpt2; /*Arquivo imagem dir. */
    FILE *fptm; /*Arquivo mosaico */
    FILE *fpts; /*Arquivo de dados de registro das imagens */
    char arq1[20], arq2[20], arqs[20], p;
    float tot1=0, tot2=0, dif;
    long int tn=0, resto, u;
    int r1, r2, pj, wj, wj2, fp, mg;
    int i, j, l, k, li1, co1, li2, co2, lin, bl=0, blk, sftE, sftN, Emos, Nmos;
    fpts = fopen("shift.dat", "rt");      /* arq registro */
    fscanf(fpts, "%d %d %d %d", &sftE, &sftN, &Emos, &Nmos);
    fscanf(fpts, "%d %d %d %d", &li1, &co1, &li2, &co2); /*carga do arq */

```

```

printf("\n%d %d %d %d\n",sftE,sftN,Emos,Nmos);
printf("\n%d %d %d %d\n",li1,co1,li2,co2);
printf("\nNome da imagem1 s/ extensão: ");
scanf("%s",arq1);
printf("\nNome da imagem2 s/ extensão: ");
scanf("%s",arq2);
for(i=0;i<20; i++) arqs[i] = arq1[i];
strcat(arq1, ".i");
strcat(arq2, ".i");
strncpy(arqs, arq1, 2); arqs[2]='\0';
strcat(arqs, "_m.i");
printf("\nLargura da faixa K de pesquisa (max = superposição): ");
scanf("%d",&fp);
printf("\nLargura da janela w de integração para junção: ");
scanf("%d",&wj2); wj = wj2/2;
fpt1 = fopen(arq1,"rb"); /* arq imagem1 */
fpt2 = fopen(arq2,"rb"); /* arq imagem2 */
fptm = fopen(arqs,"wb"); /* arq imagem mosaico */
if(sftN<0) { /* imagem esquerda mais alta */
    sftN = -1*sftN;
    for(i=0; i<sftN; i++) {
        for(j=0; j<co1; j++) {
            nci = getc(fpt1);
            putc(nci,fptm);
        }
        for(j=co1; j<Emos; j++)
            putc(0,fptm);
    }
}
else { /* imagem direita mais alta */
    for(i=0; i<sftN; i++) {
        for(j=0; j<Emos-co2; j++)
            putc(0,fptm);
        for(j=Emos-co2;j1=0; j<Emos; j++,j1++) {
            nci = getc(fpt2);

```

```

        putc(nci,fptm);
    }
}
bl=MAXMEM/Emos;
blk=(Nmos-sftN)/bl;
resto=(Nmos-sftN)%bl;
printf("\nAguarde processar %d blocos",blk);
nc1=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)bl*(long)co1));
if(nc1==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
nc2=(unsigned char *)malloc(((long)bl*(long)co2));
if(nc2==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
ncf=(unsigned char *)malloc((unsigned)((long)bl*(long)Emos));
if(ncf==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
mg=(co1+co2-Emos-fp)/2;
r1=Emos-co2+mg+wj;      /* lim esq da área de pesquisa */
r2=co1-mg-wj;          /* lim dir da área de pesquisa */
printf("\nmg=%d r1=%d r2=%d",mg,r1,r2);
for(k=0; k<blk; k++) {
    printf("\n%d",k);
    printf("\n %d",fread(nc2,1,(unsigned)((long)bl*co2),fpt2));
    printf("\n %d",fread(nc1,1,(unsigned)((long)bl*co1),fpt1));
    for(i=0; i<bl; i++) {
        for(j=0; j<Emos-co2; j++) /* ate area de superpos*/
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
        pj = pjun(r1,r2,i,co1,co2,wj); /* ponto de junção */
    }
}

```

```

for(j=Emos-co2,j1=0; j<pj; j++,j1++) { /* ate p junção */
    if((*(nc1+i*co1+j)!=0)||(*nc2+i*co2+j1)==0))
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
    else
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
    if((*nc1+i*co1+j)!=0 && *(nc2+i*co2+j1)!=0) /* calculo do */
    {
        tot1=tot1+ (float)*(nc1+i*co1+j); /*somatório de */
        tot2=tot2+ (float)*(nc2+i*co2+j1); /*nc na área de */
        tn=tn+1; /*superposição */
    }
}
for(j=pj,j1=pj-(Emos-co2); j<col; j++,j1++) { /* ate fim su-*/
    if((*nc1+i*co1+j)==0)||(*nc2+i*co2+j1)!=0) /*perposição*/
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
    else
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
    if((*nc1+i*co1+j)!=0 && *(nc2+i*co2+j1)!=0) {
        tot1=tot1+ (float)*(nc1+i*co1+j); /*somatório de */
        tot2=tot2+ (float)*(nc2+i*co2+j1); /*nc na área de */
        tn=tn+1; /*superposição */
    }
}

for(j=col,j1=(co1+co2-Emos); j<Emos; j++,j1++) /*ate final*/
    *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);

/* Suavização da junção na vizinhanca de 21 pixels */
for(j=pj-10,j1=1; j<=pj+10; j++,j1++)
    if((*nc1+i*co1+j)!=0 && *(nc2+i*co2+(j-Emos+co2))!=0)
        *(ncf+i*Emos+j) = ((21-j1)*(*(nc1+i*co1+j)) +
            j1*(*(nc2+i*co2+(j-Emos+co2))))/21.;
}
for (u=0; u< (long)bl*col; u++) /* zerando o buffer */
    *(nc1+u) = 0;

```

```

for (u=0; u< (long)bl*co2; u++) /* zerando o buffer */
    *(nc2+u) = 0;
printf("\n  %d",fwrite(ncf,Emos*bl,1,fptm));
}
free(nc1); free(nc2); free(ncf);
nc1=(unsigned char *)malloc((unsigned)(resto*(long)co1));
if(nc1==NULL) {
    puts("\nMemória insuficiente ");
    exit(1);
}
nc2=(unsigned char *)malloc((unsigned)(resto*(long)co2));
if(nc2==NULL) {
    puts("\nMemória insuficiente ");
    exit(1);
}
ncf=(unsigned char *)malloc((unsigned)(resto*(long)Emos));
if(ncf==NULL) {
    puts("\nMemória insuficiente ");
    exit(1);
}
printf("\n%d",fread(nc2,1,(resto*co2),fpt2));
printf("\n%d",fread(nc1,1,(resto*(long)co1),fpt1));
for(i=0; i<resto/* && ((p=getch())!='F')*/; i++) {
    for(j=0; j<Emos-co2; j++)
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
    pj = pjun(r1,r2,i,co1,co2,wj);
    for(j=Emos-co2,j1=0; j<pj; j++,j1++) {
        if((*nc1+i*co1+j)!=0)||(*nc2+i*co2+j1)==0)
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
        else
            *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
        if(*nc1+i*co1+j!=0 && *nc2+i*co2+j1!=0) {
            tot1=tot1 + (float)*(nc1+i*co1+j); /*somatório de */
            tot2=tot2+ (float)*(nc2+i*co2+j1); /*nc na área de */
            tn=tn+1; /*superposição */
        }
    }
}

```

```

    }
}
for(j=pj,j1=pj-(Emos-co2); j<co1; j++,j1++) {
    if((*nc1+i*co1+j)==0)||(*nc2+i*co2+j1!=0))
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
    else
        *(ncf+i*Emos+j) = *(nc1+i*co1+j);
    if((*nc1+i*co1+j)!=0 && *(nc2+i*co2+j1)!=0) {
        tot1=tot1+ (float)*(nc1+i*co1+j); /*somatório de */
        tot2=tot2+ (float)*(nc2+i*co2+j1); /*nc na área de */
        tn=tn+1; /*superposição */
    }
}
for(j=co1,j1=(co1+co2-Emos); j<Emos; j++,j1++)
    *(ncf+i*Emos+j) = *(nc2+i*co2+j1);
}
printf("\n %d",fwrite(ncf,resto*Emos,1,fptm));
free(nc1); free(nc2); free(ncf);

printf("\nMosaico final: %d linhas ",blk*bl+resto+sfiN);
printf(" %d colunas\n",Emos);
fcloseall();
printf("\nCorreção radiométrica da imagem 2 ? s/n: ");
if((p=getch())=='s') {
    dif=(tot1-tot2)/tn;
    printf("\ndif= %f t1= %f t2= %f npix= %ld",dif,tot1,tot2,tn);
    ajmed(dif,arq2,li2,co2); /* ajusta radiometria das imagens */
}
}
/* Função para ajuste de média */
void ajmed(float dif, char *arq, int li2, int co2)
{
    FILE *fptc, *fpt2;
    unsigned char nc;
    char arqc[20];

```

```

int i,j,p;
fpt2 = fopen(arq,"rb");
strncpy(arqc, arq, 2); arqc[2]='\0';
strcat(arqc, "c_r.i");
fptc = fopen(arqc,"wb");
printf("\nAguarde.\n");
for(i=0; i<li2; i++)
{
    printf("%d ",i);
    for(j=0; j<co2; j++)
    {
        nc = getc(fpt2);
        if( (int)nc + (int)dif < 0)
            nc = 0;
        else
            nc = nc + (int)dif;
        putc(nc,fptc);
    }
}
fcloseall();
}
/* Função para cálculo do ponto de junção de cada linha */
int pjun(int r1, int r2, int i, int co1, int co2, int wj)
{
    int *d;
    int l,l1,n,dd,sd,min,pj;
    d=(int *)malloc(r2-r1);
    if(d==NULL) {
        puts("memória insuficiente");
        exit(1);
    }
    for (l=r1,l1=0; l<r2; l++,l1++) {
        sd=0;
        for(n=-wj; n<=wj; n++) {
            dd = (int)( *(nc1 +i*co1 +l+n) - *(nc2 +i*co2 +(l1+wj+n) ) );
            sd=sd+ abs(dd);
        }
    }
}

```

```

    }
    *(d+l1) = sd;
}
min= *d;
pj = r1;
for(n=1;n<l1;n++)
    if( *(d+n)<min) {
        min = *(d+n);
        pj = r1 + n;
    }
free(d);
return(pj);
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/*programa: CORREÇÃO-DE-NUVENS
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Remove nuvens através de substituição de dados com imagens multitemporais
/*****/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
void main(void)
{
    FILE *fpt1, *fpt2, *fptc;
    unsigned char nc1,nc2,ncc;
    char arq1[15],arq2[15],arqc[15];
    int tl, tc, m=0, n=0, li, ci, i, j, kl, kc, ajst, dif, nuv;
    double tot=0;
    printf("\nBanda principal, banda aux, banda de saída s/ext.: ");
    scanf("%s%s%s",arq1,arq2,arqc);
    printf("\nDimensão (linhas, colunas): ");
    scanf("%d%d",&tl,&tc);

```

```

printf("\nJanela para média: tamanho, linha, coluna, delta_nuvem: ");
scanf("%d%d%d%d",&m,&li,&ci,&nuv);
strcat(arqc, ".i");
strcat(arq1, ".i");
strcat(arq2, ".i");
fpt1 = fopen(arq1, "rb");
fpt2 = fopen(arq2, "rb");
kl= tl-m+1;
kc= tc-m+1;
if(li<1) li=1;
if(ci<1) ci=1;
if(li>kl) li=kl;
if(ci>kc) ci=kc;
for (i=1; i<li; i++)
    for(j=0; j<tc; j++) {
        nc1 = getc(fpt1);
        nc2 = getc(fpt2);
    }
for(i=0; i<m; i++) {
    printf("\n%d",i);
    for(j=1; j<=tc; j++) {
        nc1 = getc(fpt1);
        nc2 = getc(fpt2);
        if((j>=ci)&&(j<ci+m)) {
            tot= tot + (nc1-nc2);
            n=n+1;
        }
    }
}
ajst=tot/n;    /* fator de ajuste de média */
fcloseall();
fpt1 = fopen(arq1, "rb");
fpt2 = fopen(arq2, "rb");
fptc = fopen(arqc, "wb");
for (i=0; i<t; i++) {

```

```

    for (j=0; j<tc; j++) {
        nc1=getc(fpt1);
        nc2=getc(fpt2);
        dif= (nc1-nc2);
        if ((dif-ajst)>nuv)
            putc(nc2+ajst,fptc);
        else
            putc(nc1,fptc);
    }
}
fcloseall();
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/* programa: ATRIBUIÇÃO-DE-COR
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Para realce especial de atribuição de cor a uma feição localizada, p.ex água, utilizando
/* uma banda de controle para separação e mascaramento
/*****/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
void main(void)
{
    FILE *fpts, *fpti, *fptc;
    unsigned char nci,ncc;
    char arqs[15],arqi[15],arqc[15];
    int i,j,li,co,p,ncmin,ncmax,ncatr;
    printf("\nBanda de controle s/ ext., linhas, colunas: ");
    scanf("%s%d%d",arqc,&li,&co);
    streat(arqc,"i");
    printf("\nNC Mínimo, NC Máximo, Valor de Atribuição: ");
    scanf("%d%d%d",&ncmin,&ncmax,&ncatr);

```

```

printf("\nBanda de Entrada, Banda de Saída s/ ext. ");
scanf("%s%s",arqi,arqs);
strcat(arqi, ".i");
strcat(arqs, ".i");
fptc = fopen(arqc, "rb");      /* arq banda de controle */
fpti = fopen(arqi, "rb");     /* arq banda de entrada */
fpts = fopen(arqs, "wb");     /* arq banda de saída */
for (i=0; i<li; i++) {
    for (j=0; j<co; j++) {
        ncc=getc(fptc);
        nci=getc(fpti);
        if ( (ncmin<ncc) && (ncc<ncmax) ) nci = ncatr;
        putc(nci, fpts);
    }
}
fcloseall;
}

/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/* programa: FILTRO-NÃO-SELETIVO
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/*****/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
void main(void)
{
    unsigned char *nci, ncs;
    FILE *fpts, *fpti;
    int p[3][3] = { {-0,-1,-0}, /* valores dos pesos */
                  {-1, 6,-1}, /* para a mascara */
                  {-0,-1,-0} }; /* 3x3 */

```

```

int i,j,i1,j1,k,l,li,co,pp;
float aux = 0;
char arqs[15],arqi[15];
printf("\nBanda de entrada s/ ext., linhas, colunas: ");
scanf("%s%d%d",arqi,&li,&co);
printf("\nBanda de Saida s/ ext. ");
scanf("%s",arqs);
strcat(arqi, ".i");
strcat(arqs, ".i");
fpti = fopen(arqi, "rb");      /* arq imagem de entrada */
fpts = fopen(arqs, "wb");     /* arq imagem filtrada */
nci=(unsigned char *)malloc((unsigned)(3*(long)co));
if(nci==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
for(i=0; i<co; i++)
    putc(0,fpts);      /* enche primeira linha c/ zeros */
for(i=1; i<(li-1); i++) {
    fseek(fpti, (long)co*(i-1),0);
    fread(nci, (long)co*3, 1, fpti);
    putc(0, fpts);      /* enche primeira coluna c/ zeros */
    printf("%d ", i);
    for(j=1; j<(co-1); j++) {
        aux=0;
        for(k=0; k<3; k++) {
            for(l=0; l<3; l++) {
                j1= j-1+l;
                aux = aux + (((float)*(nci+k*(long)co+j1)*p[k][l]));
            }
        }
    }
    if(aux < 0) aux = 0;
    if(aux >255) aux = 255;
    ncs = (unsigned char)(aux+.5);
    putc(ncs, fpts);
}

```

```

    }
    putc(0,fpts); /* enche ultima coluna c/ zeros */
}
for(i=0; i<co; i++)
    putc(0,fpts); /* enche ultima linha c/ zeros */
fcloseall();
printf("\nFIM Pressione qualquer tecla"); pp=getch();
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/

/*****/
/* programa:FILTRO-SELETIVO
/* Autor: Elmiro, M. A. T.
/* Filtra seletivamente somente algumas feições específicas p.ex terra firme, sem filtrar
/* as áreas com água
/*****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
void main(void)
{
    unsigned char *ncc, *nci, ncs;
    FILE *fpts, *fpti, *fptc;
    int p[3][3] = { {-0,-1, -0}, /* valores dos pesos */
                  {-1, 6, -1}, /* para a máscara */
                  {-0,-1, -0} }; /* 3x3 */
    int i,j,il,jl,k,l,li,co,pp,ncmin,ncmax;
    float aux = 0;
    char arqs[15],arqi[15],arqc[15];
    printf("\nBanda de controle s/ ext., linhas, colunas: ");
    scanf("%s%d%d",arqc,&li,&co);
    strcat(arqc,".i");
    printf("\nNC Mínimo, NC Máximo: ");

```

```

scanf("%d%d",&ncmin,&ncmax);
printf("\nBanda de Entrada, Banda de Saída s/ ext. ");
scanf("%s%s",arqi,arqs);
strcat(arqi,".i");
strcat(arqs,".i");
fptc = fopen(arqc,"rb");      /* arq imagem de controle */
fpti = fopen(arqi,"rb");     /* arq imagem bruta */
fpts = fopen(arqs,"wb");     /* arq imagem filtrada */
ncc=(unsigned char *)malloc((unsigned)(3*(long)co));
if(ncc==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
nci=(unsigned char *)malloc((unsigned)(3*(long)co));
if(nci==NULL) {
    puts("memória insuficiente ");
    exit(1);
}
for(i=0; i<co; i++)
    putc(0,fpts);      /* enche primeira linha c/ zeros */
for(i=1; i<(li-1); i++) {
    fseek(fpti,(long)co*(i-1),0);
    fread(nci,(long)co*3,1,fpti);
    fseek(fptc,(long)co*(i-1),0);
    fread(ncc,(long)co*3,1,fptc);
    putc(0,fpts);     /* enche primeira coluna c/ zeros */
    printf("%d ", i);
    for(j=1; j<(co-1); j++) {
        aux=0;
        if((*ncc+(long)co+j)<ncmin || (*ncc+(long)co+j)>ncmax) {
            for(k=0; k<3; k++) {
                for(l=0; l<3; l++) {
                    j1= j-1+l;
                    aux = aux + (((float)*(nci+k*(long)co+j1)*p[k][l]));
                }
            }
        }
    }
}

```

```
    }
    if(aux < 0) aux = 0;
    if(aux >255) aux = 255;
    ncs = (unsigned char)(aux+.5);
    }
else
    ncs = *(nci+(long)co+j);
    putc(ncs,fpts);
    }
putc(0,fpts); /* enche ultima coluna c/ zeros */
}
for(i=0; i<co; i++)
    putc(0,fpts); /* enche ultima linha c/ zeros */
fcloseall();
printf("\nFIM Pressione qualquer tecla"); pp=getch();
}
/***** FIM-PROGRAMA *****/
```