



AUTORES / AUTHORS
 PALAVRAS CHAVES / KEY WORDS
 MODELO LINEAR DE IMAGEAMENTO
 FUSÃO DE CANAIS
 PPROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

AUTORIZADA POR / AUTHORIZED BY
Ralf Gielow
 Ralf Gielow
 Pres. Cons. de Pós Grad.

AUTOR RESPONSÁVEL / RESPONSIBLE AUTHOR
Eneas Rodrigues Brum
 Eneas Rodrigues Brum

DISTRIBUIÇÃO / DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY
Gerald Jean Francis Banon
 Gerald Jean Francis Banon

CDU/UDC
 528.700.7

DATA / DATE
 Novembro 1989

TÍTULO / TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5035-TDL/403
	<p>INTEGRAÇÃO DOS CANAIS MULTIESPECTRAIS E PANCROMÁTICOS DO SENSOR HRV (SPOT) PARA OBTENÇÃO DE COMPOSIÇÕES COLORIDAS COM RESOLUÇÃO ESPACIAL PRÓXIMA A 10 m.</p>
AUTORES / AUTHORSHIP	<p>Eneas Rodrigues Brum</p>

ORIGEM / ORIGIN
 PG/DPA

PROJETO / PROJECT
 SER

Nº DE PAG. / NO OF PAGES
 113

ULTIMA PAG. / LAST PAGE
 D-5

VERSÃO / VERSION

Nº DE MAPAS / NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho relata os procedimentos metodológicos e os resultados alcançados com a fusão digital dos canais multi-espectrais e pancromático do sensor HRV-SPOT. O método implementado para integração de imagens de diferentes resoluções é obtido através de um algoritmo baseado num modelo linear para o imageador. Os parâmetros desse modelo são extraídos a partir de curvas de responsividade espectral do sensor e de relações provenientes da estrutura espacial da cena. Esse algoritmo é testado e comparado com os métodos IHS e de CLICHE, os quais são descritos. Os resultados obtidos são satisfatórios, sendo geradas imagens coloridas com resolução espacial de 10 m.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em 30 de junho de 1989.

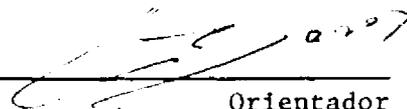
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas



Presidente

Dr. Gerald Jean Francis Banon



Orientador

Dr. Fernando T. Sakane



Membro da Banca
-convidado-

Dr^a Celina Foresti



Membro da Banca

Candidato: Enéas Rodrigues Brum

São José dos Campos, 30 de junho de 1989

Aos meus filhos,
Letícia, Carolina e Rafael,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

As pessoas que, discutiram, criticaram e de alguma forma ajudaram a realizar este trabalho.

Especiais agradecimentos: ao analista João Camilo da Silva pelo desenvolvimento de programas utilizados na execução de tratamentos; à Elenir M. da Rosa e Sandra R.S. da Cruz que digitaram o texto; às analistas Mirna F.O. Petrusanis e Josiane E.R. Cleto, ao físico Vicente Alonso Perdiz e ao capitão Luiz Carlos B. Ribeiro pela valiosa colaboração.

Ao Instituto de Atividades Espaciais - IAE, pelos meios colocados à disposição.

Ao Instituto de Atividades Espaciais - INPE, pelo apoio de seus técnicos.

Ao Dr Gerald Jean Francis Banon pela orientação e estímulo, fatores fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

ABSTRACT

This work presents the methodological procedures and the results obtained through digital merging of multispectral and panchromatic image data collected by HRV-SPOT sensor. The techniques described provided improvements in spatial and spectral resolutions through an algorithm based on a linear model. The computation parameters have been based on data obtained from spectral responsivity curves and spatial relationship among pixels in each channel. Some other techniques are described. The IHS transformation and product-square root methods are performed. A new algorithm for combining SPOT satellite images with two different resolutions is presented. A software to perform these operations was developed.

SUMARIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>xii</i>
LISTA DE TABELAS.....	<i>xiv</i>
LISTA DE SIMBOLOS	<i>xv</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	5
2.1 - Elementos de física para a aquisição	5
2.1.1 - Cenas e imagens	5
2.1.2 - Imagens fotográficas e imagens digitais	6
2.1.3 - Resolução espacial	7
2.1.4 - Compromisso entre resolução espectral e radiométrica...	8
2.1.5 - Efeitos atmosféricos.....	9
2.2 - Características ópticas e radiométricas do sistema de de- tecção da câmara "HRV-SPOT"	10
2.2.1 - Funções da unidade de detecção	11
2.2.2 - Componentes da unidade de detecção	14
2.2.3 - Desempenho	15
2.3 - Elementos de álgebra vetorial.....	19
2.3.1 - Definições e operações.....	19
2.3.2 - Soluções para um sistema linear.....	23
<u>CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	25
3.1 - Fusão de de dados de diferentes sensores	25

3.2 - Integração de dados SPOT, modos pancromático e multiespectral.....	29
<u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA.....</u>	35
4.1 - Modelo físico/matemático da aquisição de dados.....	35
4.1.1 - Valor do elemento de imagem para uma subcena.....	36
4.1.2 - Modelo físico.....	38
4.1.3 - Determinação dos fatores do sistema de equações.....	41
4.2 - Reamostragem dos canais multiespectrais.....	46
4.2.1 - Modelo físico da reamostragem.....	48
4.2.2 - Implementação da reamostragem.....	56
4.3 - Material	56
4.4 - Registro dos canais reamostrados e canal P.....	59
4.5 - Teste de métodos de fusão alternativos.....	60
4.5.1 - Método de Cliche.....	60
4.5.2 - Transformação IHS.....	62
4.6 - Fusão por operador matricial.....	62
4.6.1 - Montagem das equações.....	63
4.6.2 - Solução para o sistema.....	65
4.6.3 - Implementação do algoritmo.....	67
<u>CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	71
5.1 - Reamostragem e filtragens adaptativas.....	71
5.2 - Resultados dos testes de fusão dos métodos de Cliche e IHS.....	72
5.2.1 - Método de Cliche	72

5.2.2 - Método de transformações IHS.....	74
5.3 - Resultados do método do operador matricial.....	75
5.3.1 - Características do produto obtido.....	77
<u>CAPITULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</u>	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APENDICE A - ALGORITMO DE MONTAGEM DE CANAIS.	
APENDICE B - ALGORITMO DE FUSÃO MÉTODO CLICHE.	
APENDICE C - ALGORITMO DE FUSÃO POR OPERADOR MATRICIAL.	
APENDICE D - MATRIZES UTILIZADAS PARA SOLUCIONAR O SISTEMA DE EQUAÇÕES.	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Divisor óptico de linha (DIVOLI).....	12
2.2 - Divisor espectral de feixe.....	13
4.1 - Subcena em três canais virtuais com resolução espacial de 10 metros.....	40
4.2 - Representação da imagem gravada pelo sensor HRV-SOPT.....	39
4.3 - Curvas de responsividade espectral dos canais P, S_1, S_2 e S_3 do sensor HRV, satélite SPOT.....	42
4.4 - Vizinhança de pixel (i, j)	50
4.5 - Histogramas do canal S_3 original (a) e com filtragem adaptativa (b).....	55
4.6 - Subcena SPOT, canais S_3, S_2 e S_1 ; composição RGB.....	58
4.7 - Subcena SPOT, canal P.....	58
4.8 - Esquema do algoritmo matricial para simulação de 3 canais SPOT, com resoluções de 10 metros.....	68
5.1 - Aeroporto de Cumbica, imagem SPOT canais P, S_1, S_2 e S_3 , obtida por fusão método de CLICHE.....	73
5.2 - Aeroporto de Cumbica, imagem SPOT canais P, S_1, S_2 e S_3 , obtida por transformções IHS.....	75
5.3 - Imagens SPOT canais P_1, S_2, S_3 , obtida por operador matricial.....	78
5.4 - Subcenas SPOT canais P, S_1, S_2 , e S_3 , obtidas por operadores matriciais $\nu = 0,5$; $\nu = 0,7$; matriz 'M' = I... ..	78
5.5 - Subcenas SPOT, canais P, S_1, S_2 e S_3 , obtidas por fusão respectivamente: IHS, CLICHE, operador matricial... ..	79
5.6 - Canal E_1 resultante dos métodos: IHS, CLICHE e operador matricial.....	80
5.7 - Canal E_2 resultante dos métodos: IHS, CLICHE e operador matricial.....	80

5.8 - Canal E_3 resultante dos métodos: IHS, CLICHE e operador matricial.....	81
5.9 - Detalhe ampliado da figura 5.5.....	82

LISTA DE TABELAS

2.1 - Valores típicos de responsividade espectral e variações no campo de visada.....	17
2.2 - Valores medidos e teóricos de razão/sinal ruído para o sensor HRV-SPOT.....	17
3.1 - Faixas de operação do "scanner" DAEDALUS DS-1260; do satélite SPOT e coeficientes de simulação.....	31
4.1 - Áreas das curvas de responsividade espectral dos canais P, S ₁ , S ₂ , e S ₃ ; Total e nos limites das faixas dos canais virtuais.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, x - Vetores
- C - Coeficiente de calibração radiométrica
- F - Fator de calibração
- G - Ganho
- I - Matriz identidade
- i, j - Versores de sistema de coordenadas matriciais
- $L(\lambda)$ - Radiância espectral
- m, n - Elementos de matriz diagonal
- M, Z, Y - Matrizes
- rd - Radiano
- $R(\lambda)$ - Responsividade espectral
- Y^{-1} - Inversa da matriz Y
- Y^T - Transposta da matriz Y
- Y^- - Pseudo inversa da matriz Y
- ϵ - Ruído
- λ - Comprimento de onda
- Φ - Fluxo radiante
- ν - Coeficiente de ponderação para matriz diagonal
- λ_S - Valor médio de faixa de responsividade espectral
- $\Delta\lambda_S$ - Variação de valor médio de faixa de responsividade espectral

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

É crescente a disponibilidade de imagens obtidas por diferentes sensores, como aqueles instalados na série dos satélites norte americanos LANDSAT ou do francês SPOT, em várias faixas do espectro eletromagnético. Este fato, possibilita, através de inferências estatísticas e processamento de dados, a geração de novas imagens. Essas novas imagens deverão conter mais informações que qualquer das imagens primitivas isoladamente. A apresentação dessas informações combinadas permitirá ao intérprete uma extração de informações mais rápida e precisa que ao analisar as imagens separadamente.

Integração ou fusão de dados coletados por diferentes sensores, com finalidade de utilizar simultaneamente informações complementares, está se tornando um crescente e importante componente do processamento digital de imagens. Através da fusão digital de diferentes produtos, o usuário pode ter as vantagens das características únicas de cada conjunto de dados. Diversos trabalhos existem, onde dados coletados por diferentes sensores, em diferentes datas, foram fundidos digitalmente para processamento e análise.

Combinar dados, de diferentes sensores, na sua forma original é técnica já utilizada com bons resultados. Neste caso são feitas correções nos dados de cada canal sem interação com os de outro canal e não há incrementos (importantes) nos valores de informação da imagem.

Os fatores, escala e resolução espacial das imagens exigem soluções específicas para execução de fusão usando sensores de diferentes características.

A feitura de combinações com material em meio físico, como filmes ou transparências, apresenta dificuldades relacionadas com a pequena flexibilidade para execução de correções geométricas, por meios mecânicos. Esse procedimento apresenta restrições quando se visa a obtenção de produtos precisos. O uso de um sistema de tratamento digital pode superar essas restrições eliminando incompatibilidades relacionadas ao ajuste geométrico, além de permitir muitas alternativas de manipulação de dados.

A atual metodologia de combinar dados de diferentes fontes ou sensores envolve dois passos distintos. O primeiro refere-se a registro geométrico dos dados. O segundo passo envolve a fusão da informação, propriamente dita.

Há vários métodos que podem ser usados para o registro geométrico de diferentes imagens. Uma das possibilidades é a formatação dos dois conjuntos de dados para aproximadamente o mesmo tamanho de "pixel" antes de realizar o registro. Outro caminho é a utilização de algoritmos de registro de imagens que realizem simultaneamente as operações de interpolação de "pixels" e compatibilização de resoluções espaciais.

Quanto à fusão das imagens já registradas geométricamente é possível a criação de inúmeros algoritmos.

A viabilidade de um adequado procedimento de fusão de dados cria perspectivas interessantes para especificação de sistemas sensores. Segundo Mulder (1979) duas observações a respeito de informações pictoriais são suportadas por estudos da percepção humana:

- a) a informação espectral (cores) indica-nos alguma propriedade de uma área. Esta informação está na faixa de baixa frequência.

b) Imagens em preto e branco dão informações sobre estrutura, textura, sombreamento, linhas e contornos: estes dados estão na faixa da alta frequência.

O olho humano faz o pré processamento desses dados antes de enviá-los ao cérebro.

A aplicação desses conceitos, em um sensor remoto, resultaria em redução na taxa de transmissão de dados. Teríamos, por exemplo, um canal de resolução espacial entre 5 a 10 metros, operando numa faixa larga do espectro de radiação eletromagnética, com oito níveis de cinza, e outros três ou mais canais com resolução espacial de 40 a 80 metros e 256 níveis de cinza de resolução radiométrica, operando em faixa estreita (boa resolução espectral). Da capacidade de se realizar a fusão dessas informações pode advir a operacionalidade de sistemas com maior resolução espacial, maior resolução espectral e taxas de dados compatíveis com tecnologia existente.

O objetivo deste trabalho é propor um método de fusão de imagens, através da estimativa de valores para cada pixel, em cada canal (Banon, 1983). Esses valores estimados serão resultado da solução matemática de um sistema de equações lineares criadas a partir de características de operação do sensor HRV-SPOT e dos atributos espaciais da cena.

Dois algoritmos de fusão já executados (Cliche et al. 1985; Dutra et al. 1986) serão testados para comparação de resultados.

A área teste escolhida situa-se nas proximidades do aeroporto de Cumbica, cidade de São Paulo, e está contida na órbita/ponto WRS 716-397. Os dados SPOT utilizados; do modo pancromático, são da data de 04/04/86, nível 1B; do modo multiespectral, de 12/05/86, nível 1B. O fato de haver defasagem temporal entre o registro das cenas deverá acarretar na existência de

áreas com grandes diferenças de tema. No entanto, o aspecto geral da imagem não é muito afetado.

No Capítulo dois serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento dos trabalhos. Será descrito o sistema SPOT e sensor HRV. Serão resumidamente apresentados fundamentos de física para aquisição da imagem e elementos de álgebra linear.

Técnicas de fusão de imagens já empregadas serão discutidas no Capítulo três.

No Capítulo quatro será exposta uma metodologia para reamostragem e discutidos os algoritmos para sua realização. Neste capítulo serão descritos os procedimentos de execução do registro espacial. Será apresentado ainda um algoritmo para geração de novos canais através da solução de um sistema de equações lineares.

No Capítulo cinco serão analisados os resultados obtidos.

No capítulo final serão apresentadas conclusões e sugestões baseadas na experiência adquirida na execução deste trabalho.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo serão apresentados conceitos necessários à compreensão dos assuntos tratados no decorrer deste trabalho.

2.1 - ELEMENTOS DE FÍSICA PARA AQUISIÇÃO

2.1.1 - CENAS E IMAGENS

Quando uma cena é vista de um determinado ponto, a luz recebida pelo observador varia em função dos fatores: coordenadas angulares de iluminação e posição do observador (geometria de aquisição); reflectância do alvo e características da iluminação (Rosenfeld e Kak, 1982).

Num aparato óptico os raios de luz de cada ponto da cena, dentro do campo de visada, são coletados por uma lente e direcionados ao ponto correspondente da imagem. Pontos na cena a diferentes distâncias da lente (coletor) vão dar origem a pontos em diferentes distâncias na imagem. Porém, quando a cena está muito distante do sensor os pontos da imagem formam-se aproximadamente no mesmo plano, dito plano focal. O imageamento consiste então, em transformar uma informação da cena em padrão de iluminação no plano da imagem. O padrão de iluminação da cena pode ser gravado ou medido colocando-se algum tipo de detector no plano da imagem.

Cada detector tem uma responsividade espectral característica, isto é, sua resposta varia com a cor da luz. A resposta total em um dado ponto pode ser expressa por uma integral da forma:

$$\int_0^{\infty} R(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda,$$

onde $\phi(\lambda)$ é o fluxo radiante da luz e $R(\lambda)$ a responsividade em função do comprimento de onda (American Society of Photogrammetry, 1983). Isto significa que quando usamos apenas um detector estamos representando a informação da cena por um valor de brilho para cada ponto. Para representarmos cores usamos outros valores de brilho em um conjunto de bandas espectrais (usualmente três).

2.1.2 - IMAGENS FOTOGRÁFICAS E IMAGENS DIGITAIS.

A luz recebida de uma cena por um sistema óptico produz uma imagem bidimensional. Esta imagem pode ser diretamente convertida num sinal elétrico, por um detector, ou gravada fotograficamente. Matematicamente uma fotografia é definida por uma função $f(i,j)$ de duas variáveis (coordenadas no plano da imagem). Os valores da função são medidas de brilho nas diversas bandas espectrais. No caso de fotografia preto e branco esses valores serão chamados de níveis de cinza. Esses valores são reais, não negativos e limitados.

Quando uma fotografia é digitalizada, um processo de amostragem é usado para extrair da figura um conjunto discreto de números reais. Estas amostras são usualmente os níveis de cinza dos elementos de uma grade de pontos regularmente espaçada. A grade é na maioria das vezes determinada por coordenadas cartesianas ou retangulares.

As amostras têm geralmente seus valores quantificados em níveis discretos podendo ser gravados como inteiros. O resultado da amostragem e quantização é uma imagem digital, ou seja, uma matriz de valores inteiros. Um elemento de uma imagem digital é chamado de

elemento de imagem (pixel). O valor de um pixel corresponde ao seu nível de cinza.

Exceto nas bordas do arranjo (matriz), qualquer ponto (i,j) de uma figura digital tem oito vizinhos:

$$\begin{bmatrix} (i-1, j-1) & (i-1, j) & (i-1, j+1) \\ (i, j-1) & (i, j) & (i, j+1) \\ (i+1, j-1) & (i+1, j) & (i+1, j+1) \end{bmatrix}$$

Neste esquema da vizinhança 3x3 de um ponto foram usadas coordenadas matriciais. Observa-se que os vizinhos diagonais estão 2 unidades distantes do ponto (i,j), ao passo que os vizinhos horizontais estão uma unidade distantes. Podemos levar em consideração vizinhanças maiores que a 3x3. Neste caso um ponto passa a ter muitos tipos de vizinhos (Rosenfeld e Kak, 1982).

2.1.3 - RESOLUÇÃO ESPACIAL

O conceito de resolução espacial pode descrever de diferentes maneiras as características de um sistema imageador. No caso mais simples, resolução espacial pode ser definida como a menor distância entre dois objetos que um sensor pode gravar distintamente. A maneira de medir esta grandeza varia com o tipo de sensor em estudo, não havendo possibilidade de converter as medidas de um sensor para outro.

Segundo o Manual de Sensoriamento Remoto publicado pela Sociedade Americana de Fotogrametria, ASPRS (1983), a definição de resolução espacial pode ser enquadrada em uma das quatro categorias:

- a) Propriedades geométricas do sistema imageador;

- b) Capacidade de distinção entre alvos pontuais;
- c) Capacidade de medir a periodicidade de alvos repetitivos;
- d) Capacidade de medir propriedades espectrais de pequenos objetos finitos.

Resolução espacial, em termos de propriedades geométricas do sistema imageador, é usualmente descrita como campo de visada instantânea (IFOV). Esta grandeza é função da altitude da órbita do satélite, tamanho do detector e distância focal do sistema óptico. O ângulo sólido, que descreve o IFOV, quando projetado sobre a cena dá nos a resolução em termos geométricos. No caso do satélite SPOT temos para o modo pancromático um IFOV de $12 \mu\text{rd}$, que projetado no solo, para uma órbita nominal de 832 km, resulta num círculo de 9.98m de diâmetro. Para o modo multiespectral temos um IFOV de $25.97 \mu\text{rd}$, relativo a um círculo no solo de 21.61 m (Begni et alii, 1985)

2.1.4 - COMPROMISSO ENTRE RESOLUÇÃO ESPECTRAL E RADIOMÉTRICA

Resolução espectral de um sensor é conceito definido pela largura das faixas gravadas. Faixas estreitas permitem a aquisição de um dado espectral mais preciso do alvo. Para pequenas larguras de faixa, entretanto, o total de energia refletido pelos alvos é pequeno, dificultando a separação do ruído e a quantização de níveis. A capacidade de quantizar níveis de cinza define justamente a grandeza resolução radiométrica (Slater, 1980).

Na definição das características do sensor, o compromisso entre resoluções espectral e radiométrica é levado em conta. Na verdade, esse compromisso estende-se também à resolução espacial. Tomemos, por exemplo, um sensor em que se tem uma resolução espacial de 10 metros. Neste caso, a quantidade de energia recebida

pelo coletor, para uma determinada faixa do espectro, será quatro vezes menor que num sensor de resolução espacial de 20 metros. Caso esses sensores estejam na mesma plataforma ou órbita, o tempo de residência, (tempo em que o fluxo radiante é coletado para cada pixel) será a metade. Esses dois efeitos provocam uma diferença na leitura absoluta do valor do fluxo radiante de 8 vezes. Para atenuar estes efeitos aumenta-se o tamanho do coletor, a eficiência da eletrônica e a sensibilidade do detector até os limites tecnológicos ou operacionais.

2.1.5 - EFEITOS ATMOSFÉRICOS

A medida do fluxo radiante incidente sobre um detector depende, além das características de iluminação e geometria de aquisição da cena, de efeitos atmosféricos. A partir da análise desses efeitos é que se pode obter dados a respeito da estrutura física e química dos objetos.

A energia eletromagnética interage com a atmosfera, sendo refletida, absorvida ou espalhada. Um determinado feixe de fótons pode ser parcialmente absorvido e reemitido com diferentes níveis de energia ou ser refletido. Esses processos ocorrem em todas as direções, fazendo com que parte do fluxo radiante registrado pelo detector seja também produto de reflexões diretas da atmosfera e da reflexão do alvo de iluminação difusa.

São fatores que determinam a forma e intensidade dos efeitos atmosféricos (American Society of Photogrammetry, 1983).

a) Densidade da camada - valor que varia com altitude e pressão atmosférica.

b) Altura da plataforma - quanto mais alto o sensor maior a camada a ser ultrapassada.

c) Composição - gases e particulados interagem de forma diferente com a radiação eletromagnética.

d) Ângulo do imageamento.

Para correção desses efeitos utilizam-se:

- a) Modelos de atmosfera terrestre e cálculo probabilístico de interações;
- b) comparação de valores adquiridos com valores conhecidos na cena;
- c) ajuste da curva de distribuição de níveis de cinza.

Discutidos esses efeitos e compromissos existentes num sistema genérico de imageamento, passemos a conhecer as soluções encontradas para a exequibilidade do sensor HRV.

2.2 - CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS E RADIOMÉTRICAS DO SISTEMA DE DETECÇÃO DA CÂMARA "HRV-SPOT"

As câmaras de alta resolução no visível (HRV) do satélite SPOT produzem imagens da Terra de uma órbita de 832 km de altitude. O campo de visada instantânea (IFOV) varre o solo permitindo a formação de uma faixa de 60 km de largura com 10 m de resolução no módulo Pancromático (P).

A qualidade óptica e radiométrica das imagens resulta diretamente das características dos detectores e do plano focal do subsistema óptico. Detectores e subsistema ópticos são integrados numa parte do equipamento denominado Unidade de Detecção.

A unidade de detecção da câmara de alta resolução no visível (HRV) desenvolvida para o satélite SPOT, é um equipamento optoeletrônico, localizado no plano focal do sistema óptico cujas principais funções são (Corlay et al. 1984):

- a) converter sinais ópticos em sinais eletrônicos.
- b) separar as quatro bandas espectrais.
- c) compôr linhas de detecção de 6.000 pixels.

As seguintes características ópticas e radiométricas serão discutidas:

- a) responsividade espectral;
- b) uniformidade espacial de responsividade;
- c) razão sinal/ruído;
- d) Função de Transferência de Modulação (MTF);
- e) características geométricas relacionadas à qualidade da imagem.

A descrição mais detalhada dessas características é apresentada por Corlay et al. (1984).

2.2.1 - FUNÇÕES DA UNIDADE DE DETECÇÃO

A unidade de detecção converte o sinal óptico de uma faixa do solo, dentro da visada do instrumento, em um sinal elétrico, adequado para o processamento, numa frequência compatível com a velocidade do satélite e a resolução requerida.

As funções da unidade de detecção (Corlay et al. 1984):

- a) Conversão do sinal óptico em eletrônico: Realizada por uma composição de estruturas CCD (dispositivo eletrônico), de 1728

detetores de tamanho $13 \times 13 \mu\text{m}$. (Foi desenvolvido um processo particular de seleção dos elementos CCD devido à função crítica do sensor no desempenho da unidade de detecção).

- b) Separação Espacial: Realizada por um divisor óptico chamado DIVOLI (Divisor Óptico de Linha); necessária para dividir a imagem em quatro partes, cada uma varrida por um arranjo CCD. As quatro composições CCD devem ser montadas juntas, numa mesma linha de maneira que suas imagens formem uma linha reta contínua.
- c) O DIVOLI permite a decomposição óptica da linha de imagem em quatro grupos de 1500 pontos, obtendo-se a linha pancromática. As linhas de 3000 pontos, das bandas S_1 , S_2 e S_3 , são obtidos com o agrupamento eletrônico de cada dois detectores adjacentes.

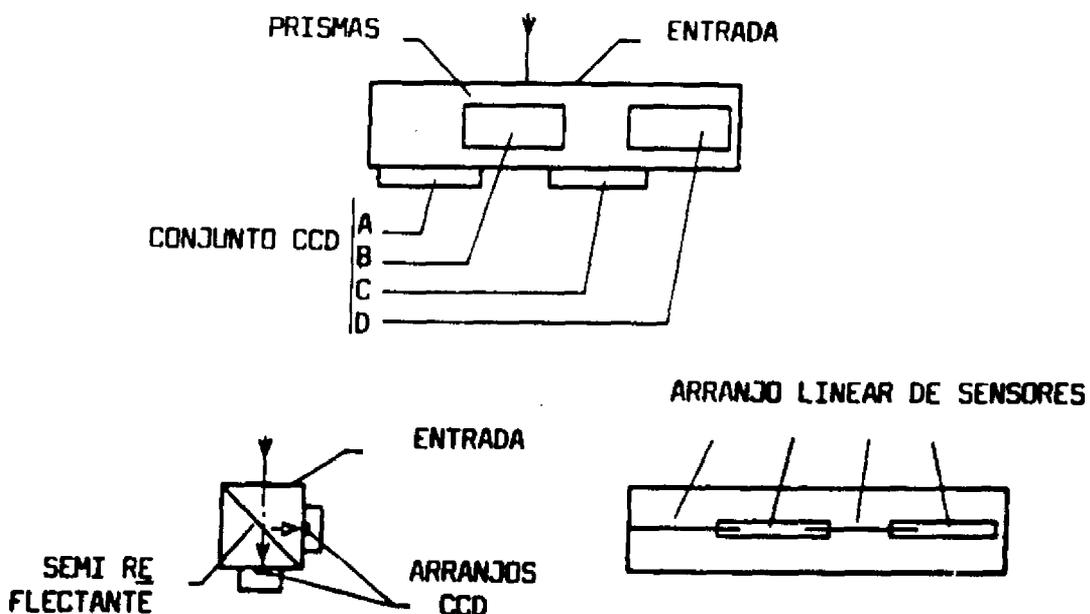


Fig 2.1 - Divisor óptico de linha (DIVOLI).
FONTE: Corlay et al. (1984), p. 944.

d) Separação Espectral: A unidade de detecção produz dois tipos de imagens:

- 1) imagens "coloridas" com o processamento de dados em três canais multiespectrais na faixa do visível e do infravermelho próximo (500-900 nm).
- 2) imagens "preto e branco" em um quarto canal denominado pancromático (500-750 nm).

Para que não seja necessário muito esforço computacional, as imagens nos três canais multiespectrais são sobrepostas ópticamente. Os sensores e componentes ópticos são instalados de maneira precisa para se obter estabilidade mecânica perfeita.

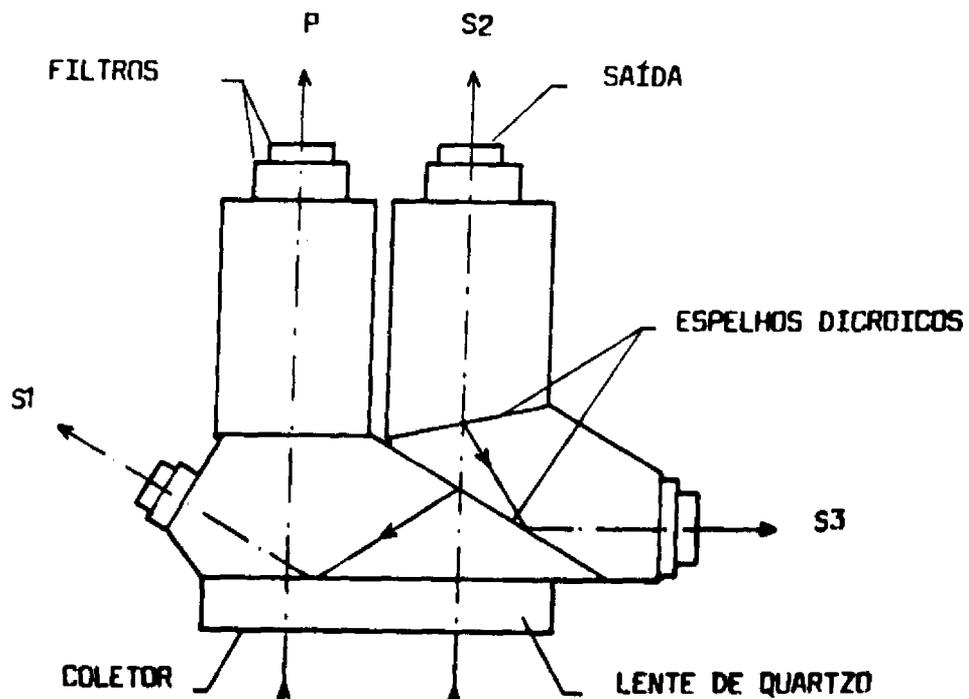


Fig 2.2 - Divisor espectral de feixe.
FONTE: Corlay et al. (1984), p. 944.

2.2.2 - COMPONENTES DA UNIDADE DE DETECÇÃO

A unidade de detecção é composta por duas subunidades: estruturas primária e secundária (Corlay et al. 1984)

A estrutura primária engloba todos os componentes da unidade de detecção e está localizada no ponto focal da câmara HRV. Essa estrutura está montada em torno do separador espectral do feixe de radiação eletromagnética, o qual produz quatro imagens distintas da cena, cada uma delas em um canal espectral. O separador de feixe é construído com prismas de vidro, os quais têm em algumas faces camadas de elemento diacróico.

Um divisor óptico é colocado em cada saída do separador de feixe. Esse divisor óptico é construído com dois prismas cobertos por camadas semi reflectantes. Pela montagem dos quatro arranjos de sensores CCD, alternadamente, nas duas faces de saída dos prismas é possível obter-se uma faixa contínua formada por 6000 detetores unitários.

Para a obtenção de linhas contínuas e homogêneas, a precisão de posicionamento dos detetores nos prismas deve ser melhor que $1 \mu\text{m}$ no plano focal (desvio lateral) e $5 \mu\text{m}$ em focalização (desvio de profundidade).

A superposição dos três canais multiespectrais requer igual tamanho das linhas de detecção com uma precisão e estabilidade do equipamento em torno de $5 \mu\text{m}$ no plano focal e $10 \mu\text{m}$ em focalização.

Cada pixel pancromático é obtido por um sensor de $13 \times 13 \mu\text{m}$ de tamanho. Os pixels dos canais modo multiespectral são obtidos com dois sensores adjacentes de $13 \times 13 \mu\text{m}$ e com o dobro do tempo de integração, resultando em um tamanho de $26 \times 26 \mu\text{m}$.

O tempo de integração para o canal pancromático é de 1,5 ms e para os canais multiespectrais 3,0 ms.

A estrutura secundária é composta por oito circuitos impressos, cada um conectado a dois conjuntos CCD.

As conexões mecânicas entre as estruturas primária e secundária são:

- a) circuitos flexíveis de conexão entre os circuitos impressos e os conjuntos CCD para permitir o contato elétrico.
- b) condutores térmicos flexíveis entre as estruturas secundária e os conjuntos CCD para remover e conduzir o calor dissipado.

A flexibilidade dessas conexões minimiza as forças atuantes sobre os elementos ópticos e suprime interações mecânicas entre as estruturas primária e secundária.

Com a finalidade de evitar esforços termomecânicos na estrutura primária e controlar a estabilidade do sinal zero do sensor, as flutuações de temperatura dos arranjos de detectores são limitadas a mais ou menos 2°C. Para que isso ocorra, resistências de aquecimento mantêm constante a potência dissipada dentro da unidade de detecção, estando os sensores CCD funcionando ou não.

2.2.3 - DESEMPENHO

As principais características de desempenho do sistema de detecção da câmara HRV-SPOT são:

a) Resposta espectral

As bandas espectrais definidas a meia altura da amplitude de onda para os quatro canais espectrais são:

Canal S₁ 495 a 585 nm ;
Canal S₂ 615 a 680 nm ;
Canal S₃ 775 a 880 nm e
Canal P(pancromático) 500 a 730 nm

As curvas de responsividade espectral estão apresentadas na Figura 4.3.

b) Variações de Responsividade Espectral

As variações de responsividade espectral são devidas a dois fatores: variação de transmitância do divisor de feixe de radiação para diferentes pontos da linha de visada e dispersão de responsividade espectral entre sensores de um mesmo arranjo ou entre diferentes arranjos.

Flutuações de responsividade espectral são caracterizadas pelas variações da média do comprimento de onda dentro da faixa de operação de um arranjo de sensores . A equação:

$$\lambda_S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.2)$$

onde, $R(\lambda)$ é a responsividade espectral do detector considerado e a faixa espectral utilizável limitada por λ_1 e λ_2 , define a média da faixa de operação (Corlay et al. 1984).

A Tabela 2.1 mostra valores de λ_S e suas variações $\Delta\lambda_S$ no campo de visada.

TABELA 2.1

VALORES TÍPICOS DE RESPONSIVIDADE ESPECTRAL E VARIACOES NO CAMPO DE VISADA

CANAL	λ_S (nm)	$\Delta\lambda_S$ (nm)
S ₁	537	+1 , -1
S ₂	648	+0 , -4
S ₃	834	+0 , -4
P	607,5	+0 , -4,5

FORTE: Corlay et al.(1984).

c) Responsividade e Razão Sinal/Ruído

Para os níveis mínimo e máximo de iluminância definidos, temos na Tabela 2.2 as razões sinal/ruído calculadas e a potência de saída para iluminância máxima.

TABELA 2.2

VALORES MEDIDOS E TEÓRICOS DE RAZÃO SINAL/RUÍDO PARA O SENSOR

HRV-SPOT

CANAL	ILUMINANCIA MINIMA E _{MIN}		ILUMINANCIA MAXIMA E _{MAX}		
	SINAL/RUÍDO MEDIDO	SINAL/RUÍDO CALC.	SINAL/RUÍDO MEDIDO	SINAL/RUÍDO CALC.	POTENCIA SAIDA
S ₁	90	120	700	760	1200 mV
S ₂	40	75	650	710	900 mV
S ₃	50	80	800	850	1400 mV
P	70	80	500	625	800 mV

FORTE: Corlay et al.(1984).

O valor de saturação da iluminância é cerca de 2 a 3,5 vezes a iluminância máxima do canal espectral correspondente.

A calibração fotométrica absoluta da unidade de detecção é obtida com uma precisão aproximada de 15%.

d) Uniformidade Espacial de Responsividade

Uniformidade espacial é um parâmetro importante, especialmente para pixels de um mesmo arranjo. Variações de responsividade entre diferentes arranjos CCD podem ser corrigidas por processamento fora da unidade de detecção.

Dois tipos de efeito são considerados: não uniformidade em alta frequência espacial, devido à dispersão de responsividade em elementos do mesmo arranjo CCD, corrigido com a calibração de cada elemento; e não uniformidade em baixa frequência espacial, devido a não uniformidade de transmitância do divisor de feixe de pequenas variações de responsividade dos arranjos.

e) Qualidade da imagem

Qualidade da imagem pode ser caracterizada pela Função de Transferência de Modulação (MTF) da unidade de detecção e depende principalmente dos seguintes fatores:

- 1) características de cada arranjo CCD;
- 2) componentes ópticos;
- 3) precisão de focalização;

- 4) precisão de superposição das três linhas coloridas para o caso multiespectral.

São fatores críticos para a MTF, o próprio arranjo de detectores bem como sua precisão de focalização.

Os principais fatores que afetam a precisão entre os canais:

- a) Diferença de ampliação entre os canais no divisor de feixes;
- b) variações no tamanho das linhas de detecção;
- c) precisão da montagem.

Esses três fatores resultam em um defeito total do registro não superior a 7 ou 8 μm , medido no final das linhas de detecção.

2.3 - ELEMENTOS DE ALGEBRA VETORIAL

A seguir serão apresentadas definições e descritas operações, entre vetores e matrizes, utilizadas nas equações que compõem o sistema de transformação montado. Será discutida uma solução genérica para um conjunto de equações.

2.3.1 - DEFINIÇÕES E OPERAÇÕES

- a) Vetor

Um vetor coluna 'f' ($N \times 1$) é um arranjo vertical unidimensional

$$f = \begin{bmatrix} f \\ f^{(1)} \\ f^{(2)} \\ \vdots \\ f \\ f^{(N-1)} \\ f^{(N)} \end{bmatrix}$$

dos elementos $f(n)$, onde $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Um vetor linha 'h' ($1 \times N$) é um arranjo horizontal unidimensional

$$h = [h_{(1)} \ h_{(1)} \dots h_{(N-1)} \ h_{(N)}]$$

dos elementos $h(n)$, onde $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

b) Matriz

Uma matriz ($M \times N$), 'F' é um arranjo bidimensional

$$F = \begin{bmatrix} F(1, 1) & F(1, 2) \dots \dots F(1, N) \\ F(2, 1) & F(2, 2) \dots \dots F(2, N) \\ \vdots & \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \vdots & \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ F(M, 1) & F(M, 2) \dots \dots F(M, N) \end{bmatrix}$$

dos elementos $F(m,n)$ em linhas e colunas, onde $m = 1, 2, 3, \dots, M$ e $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

Matriz identidade 'I' é uma matriz cujos termos da diagonal principal são unidades(um) e os demais termos 0 (zero).

c) Adição de Matrizes

Sejam A, B duas matrizes ($M \times N$). A matriz soma C é uma matriz ($M \times N$) cujo elemento (m, n) é dado por:

$$C(m, n) = A(m, n) + B(m, n).$$

d) Multiplicação de Matrizes

O produto $C = AB$ de duas matrizes somente é definido quando o número de colunas de A é igual ao número de linhas de B . A matriz produto C ($M \times N$) da matriz A ($M \times P$) e da matriz B ($P \times N$) é uma matriz C ($M \times N$) cujo elemento (m, n) é dado por:

$$C(m, n) = \sum_{p=1}^P A(m, p) B(p, n)$$

e) Matriz Inversa

A matriz inversa A^{-1} , de uma matriz quadrada A , é uma matriz quadrada que tem a propriedade: $A \cdot A^{-1} = I$ e $A^{-1} \cdot A = I$. Se A^{-1} existe, a matriz A é chamada não singular; caso contrário, será chamada singular.

Se uma matriz possui inversa, essa inversa é única.

A matriz inversa de uma matriz inversa é a matriz original.

$$[A^{-1}]^{-1} = A$$

Se as matrizes A e B são não-singulares, então:

$$[AB]^{-1} = B^{-1} A^{-1} .$$

Se a matriz A é não singular e o escalar $k \neq 0$, então:

$$[kA]^{-1} = 1/k \cdot A^{-1} .$$

f) Matriz Transposta

A matriz transposta de uma matriz A (M x N) é a matriz A^T (N x M), cujas linhas são colunas de A e cujas colunas são linhas de A.

Para uma matriz A

$$[A^T]^T = A .$$

Se $A = A^T$ então A é chamada de simétrica. A matriz produto $A \cdot A^T$ e $A^T \cdot A$ são simétricas.

Para matrizes A e B

$$[AB]^T = B^T \cdot A^T .$$

Se A é não singular então A^T é não singular e

$$[A^T]^{-1} = [A^{-1}]^T .$$

g) Pseudo-Inversas de Matrizes

Uma matriz tem inversa somente quando for quadrada e não singular, ou seja; suas colunas e linhas são linearmente independentes. Surgiram necessidades, em inúmeras áreas da matemática aplicada, por algum tipo de inversa parcial de uma matriz que seja singular ou mesmo retangular. Por pseudo-inversa de uma matriz Y entendemos a matriz Y^- , associada de alguma maneira a Y , que exista para uma classe maior que a classe das matrizes não singulares; tenha algumas das propriedades da inversa comum e, quando Y for quadrada e não singular, seja a própria inversa (Rao e Mitra, 1971).

A matriz Y^- é pseudo-inversa de Y se, e somente se:

$$Y.Y^-.Y = Y$$

Se Y for não singular e quadrada, multiplicando-se os termos por Y^{-1} a esquerda e a direita temos:

$$Y^- = Y^{-1}$$

2.3.2 - SOLUÇÕES PARA UM SISTEMA LINEAR

Temos a forma geral de um sistema de equações lineares:

$$x = Y a , \tag{2.3}$$

onde Y é uma matriz ($M \times N$) que representa um sistema de M equações e N incógnitas. Este sistema pode ter solução única, ou mais de uma, quando é chamado consistente; pode não ter solução sendo dito inconsistente.

A falta de solução(s) ao conjunto de equações, às vezes, ocorre em sistemas físicos onde o vetor 'x' representa uma sequência de medições físicas de observações geradas por alguma força representada pelo vetor 'a'.

A matriz Y é formada pelo modelamento matemático do sistema físico cuja saída é 'x'.

Uma maneira, em processamento digital de sinais, de se obter as soluções do sistema é inverter a equação de transformação (2.3) para obter o vetor 'a'.

Sendo Y não singular e quadrada, há uma única solução para 'a', dada por:

$$Y^{-1} \cdot x = a , \quad (2.4)$$

No caso geral, quando Y pode ser singular ou retangular é possível, algumas vezes, não haver soluções ou haver multiplicidade de soluções (Rao e Mitra, 1971).

A existência de um vetor 'a' satisfazendo (2.3) equivale dizer que 'x' é uma combinação linear das colunas de 'Y'.

Caso exista uma solução única, o operador pseudo-inverso vai possibilitar um perfeito estimador tal que $\hat{a}=a$. Em outras palavras, será possível extrair o vetor 'a', da observação 'x', sem erro.

Conhecidos estes fundamentos, passemos a discutir experimentos que deles se utilizaram para fusão de dados de diferentes formatos.

CAPITULO 3

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste capítulo serão discutidas as experiências já realizadas ligadas à fusão de dados de diferentes sensores com o objetivo de melhorar a qualidade do produto. Os resultados obtidos nesses trabalhos e técnicas empregadas deram apoio ao desenvolvimento de nosso experimento.

3.1 - FUSÃO DE DADOS DE DIFERENTES SENSORES

A fusão de imagens de radar e MSS-LANDSAT para execução de interpretação geológica foi executada por Dally et al.(1978). O objetivo deste estudo foi obter discriminação de medidas geológicas no Vale da Morte, na Califórnia, através da combinação de dados de espalhamento e despolarização da banda L, de imagens de radar, ($\lambda=25\text{cm}$) com dados de reflectância obtidos de imagens MSS-LANDSAT.

Foram usados dados de radar com ângulos de incidência de 0° a 45° sobre um terreno plano, sendo os dados mais influenciados pelas propriedades de reflexão da cena que da geometria do imageamento. Foram usados dados de um radar de abertura sintética (SAR), nos modos de polarização vertical-vertical (VV) e vertical-horizontal (VH) e uma imagem de intensidade total MSS-LANDSAT obtida por combinação entre as bandas 4,5,6 e 7.

Dados de radar na banda L, com polarizações VV e VH foram utilizados anteriormente para discriminação entre unidades na superfície do vale. Unidades extremamente rugosas apresentaram retornos fortemente despolarizados devido a efeitos de múltiplos espalhamentos. As unidades erodidas, menos rugosas, tiveram

significante retroespalhamento, sem a presença de anomalias de polarização.

Com a combinação da imagem intensidade LANDSAT, com dados de radar de despolarização foi possível a obtenção de imagens coloridas. O registro foi feito digitalmente após a seleção de pontos de controle bem distinguíveis.

A imagem LANDSAT contém informações de reflectância da superfície. Os dados radar contêm informações de rugosidade da superfície, tamanho das partículas e constante dielétrica da camada superficial. Estas informações são complementares, especialmente neste caso onde as propriedades físicas da superfície são fortemente relacionadas com a litologia do terreno.

Neste experimento foram obtidas composições falsa cor de boa qualidade sendo perceptíveis diferenças entre as unidades litológicas. Efeitos topográficos estiveram evidentes e causaram problemas de registro. Estas imagens compostas possibilitaram uma quase completa discriminação das unidades geológicas de superfície e forneceram informações sobre duas importantes propriedades do terreno: composição e textura da superfície.

Em experimento realizado por Chavez (1986) fundiu-se imagens TM-LANDSAT com imagens aéreas digitalizadas. Dados TM-LANDSAT foram utilizados devido seu conteúdo de informação espectral. Fotografias aéreas digitalizadas com aproximadamente 4 m de resolução foram usadas pelo seu alto conteúdo de informação espacial.

A área coberta pelas imagens utilizadas está localizada a aproximadamente 30 km a oeste de Washington, contendo instalações de um aeroporto. Os dados TM-LANDSAT foram obtidos em novembro de 1982 e as fotografias em abril de 1980, na escala de 1:80000. Os dados TM foram reamostrados para uma "resolução" de aproximadamente 28,5 m e as fotografias aéreas digitalizadas com um tamanho de pixel de aproximadamente 4 m.

Para o processo de registro foi necessário formatar os dois conjuntos de dados para o mesmo tamanho de pixel, dada a extrema diferença de resolução espacial. Esta reformatação consistiu em criar pixels de 4 m para a imagem TM através da duplicação de pixels, nas direções 'x' e 'y', com um fator sete.

Esse processo de duplicação deu origem a um efeito de blocos na imagem, que foi eliminado com o uso de um filtro "passa baixa" de dimensão 7 x 7. Eliminar este efeito possibilita imprimir o produto em escalas maiores que as usuais.

Para o registro das cenas, a imagem TM-LANDSAT foi tomada como base, por seus atributos geométricos serem mais precisos para pequenas áreas. Por outro lado essa escolha também se justifica pelo fato de ser mais simples o ajuste de uma única banda pancromática do fotografia aérea que seis bandas do TM-LANDSAT.

Após o registro dos dados foi feito estudo visando determinar os melhores métodos de fusão, uma vez que, dependendo do método, certos tipos de informação são ressaltados. Algumas técnicas de combinação realçam os finos detalhes contidos na imagem (alta frequência), ao passo que outros realçam brilho de cor dos alvos. Adição, subtração ou razão entre pixels são exemplos de métodos possíveis. Transformação por principais componentes também pode produzir bons resultados. Sua utilização deve ser precedida pelo estudo da matriz de correlação entre os canais, para escolha dos canais de entrada.

Os resultados obtidos com o registro geométrico e combinação digital dos dados TM-LANDSAT com fotografias aéreas foram considerados bons. Foram feitas ampliações até a escala de 1:24.000 de boa qualidade. Os dados digitais foram combinados através da adição pixel a pixel, conforme a relação:

R = TM 4 + Foto Aérea

G = TM 3 + Foto Aérea

B = TM 2 + Foto Aérea

O objetivo do experimento foi atingido e obteve-se um produto com as qualidades geométricas da fotografia aérea e resolução espectral da imagem TM-LANDSAT.

Uma solução apresentada pelo trabalho de DUTRA et al. (1988), para a integração de dados de sensores de resoluções distintas é a descrição das cores em termos de variáveis de percepção independentes; I (intensidade), H (matiz) e S (saturação). Transformações no espaço de cores são operações em que se mudam os eixos de referência dos dados disponíveis e efetuam-se tratamentos.

Neste trabalho tentou-se obter um produto fotográfico que aproveitasse as vantagens da análise multibanda, do sensor TM, e a vantagem do poder de resolução espacial, de sensor SPOT pancromático, através da aplicação de técnicas de transformações no espaço de cores, para produzir, com a integração de dados TM-LANDSAT e HRV/SPOT, uma imagem colorida com resolução de 10 metros.

A área escolhida para o teste foi o bairro de Alfaville, Barueri, São Paulo.

O método empregado baseou-se na representação dos valores RGB, por parâmetros independentes do ponto de vista de percepção visual: A intensidade (I) corresponde ao brilho de cor e expressa as feições geométricas da cena; o matiz (H) define a cor dominante de um ponto; a saturação (S) define a quantidade de branco que compõe aquele ponto.

Neste trabalho um conjunto de imagens TM bandas 4,3 e 2, com as médias pré-ajustadas em 100 (nível de cinza), foi processado pela transformação IHS, associados a RGB respectivamente. A componente

intensidade com resolução 30 m foi substituída pela imagem pancromática SPOT, com resolução de 10 m, registrada às imagens TM.

Os componentes H e S das bandas TM 4,3 e 2 foram mantidas e reamostradas de modo tal que cada nove pixels do SPOT correspondessem a um valor de H e S, derivados das imagens TM. Foi adicionado o valor 0,3 à componente saturação.

Após isso foi feita a transformação IHS inversa e a imagem resultado, com resolução de 10 m, pode ser apresentada no monitor do vídeo.

A avaliação do produto obtido, deu-se pela comparação de resultados de mapeamento de uso do solo urbano realizados com a interpretação da imagem SPOT pancromático e interpretação da composição colorida TM.

A imagem colorida, resultado da integração dos dados entre os sensores, reuniu as vantagens dos outros conjuntos de dados considerados isoladamente, oferecendo definição geométrica dos alvos, atributo da imagem SPOT pancromática, e definição espectral contida na imagem TM.

Preservou-se, no produto final, as propriedades da melhor resolução espacial e adicionou-se qualidades espectrais do outro sensor. Concluiu-se, portanto, como eficiente a técnica de combinação de dados de diferentes resoluções espaciais, utilizando-se transformações no espaço de cores,

3.2 - FUSÃO DOS CANAIS PANCROMÁTICO E MULTIESPECTRAIS DO SENSOR HRV-SPOT

O incremento da resolução espacial de dados SPOT, modo multispectral, para a obtenção de um produto similar a uma fotografia

aérea falsa cor, foi o objetivo do trabalho realizado por Cliche, G et al.(1985). Neste caso os dados foram simulados, isto é, obtidos por outro sensor e formatados para as características do HRV-SPOT.

Os dados originais para execução dos estudos foram obtidos por um "scanner" multiespectral de onze canais DAEDALUS DS-1260, de uma altitude de 4875 m. Este instrumento possui onze canais nas faixas de frequência do visível e infravermelho próximo.

Para simular dados SPOT abordou-se o problema de duas maneiras: primeiramente a simulação espectral e a seguir a simulação espacial.

Para simular faixas semelhantes às faixas do satélite SPOT foram usados pesos para cada faixa do "scanner" e feita uma somatória; assim as faixas 3,4,5,6,7 e 8 foram usadas para simular o canal pancromático; as faixas 4 e 5 o canal S_1 (verde); faixas 6 e 7 o canal S_2 (vermelho); 9 o canal S_3 (infravermelho). A Tabela 3.1, apresenta os coeficientes empregados e as faixas de operação do scanner e do sensor HRV-SPOT.

TABELA 3.1

FAIXAS DE OPERAÇÃO DO 'SCANNER' DAEDALUS DS-1260; DO SATELITE
SPOT E COEFICIENTES DE SIMULAÇÃO

IMAGEADOR MULTIESPECTRAL	SPOT BANDAS 'S'	SPOT BANDA P
1 - 390 - 415	COEFICIENTES: 0,595 0,405 S (497-595) 0,255 ¹ 0,745 S (616-675) 2 1,000 S (788-894) 3	COEFICIENTES: 0,005 0,280 0,237 0,172 P(495-730) 0,217 0,089
2 - 415 - 450		
3 - 445 - 495		
4 - 500 - 550		
5 - 550 - 595		
6 - 590 - 645		
7 - 625 - 695		
8 - 680 - 780		
9 - 765 - 895		
10 - 865 - 1003		
11 - 1550 - 1750		

FONTE: Cliche et al. (1985).

Para a simulação espacial usou-se os pixels originais de 10 x 12 m diretamente para o canal P. Para os canais S_n foi feita reamostragem com duplicação de pixels por meio de uma operação que evitasse efeitos de bloco na imagem.

Foram testados três diferentes algoritmos de fusão dos dados com o objetivo de se obter um produto semelhante a uma fotografia aérea infravermelho falsa cor.

Os melhores resultados foram obtidos pelo uso de:

GANHO (P.S₁)^{1/2} + OFFSET para o azul

GANHO (P.S₂)^{1/2} + OFFSET para o verde e

GANHO (0,25 P + 0,75 S₃) + OFFSET para o vermelho

Onde 'GANHO' é um fator multiplicativo e 'OFFSET' um valor aditivo.

A integração por meio desses algoritmos teve bons resultados uma vez que, o valor de cada pixel nos canais P e S_n é uma função da refletividade dos elementos de cena, sendo $P.S_n$ proporcional a essa grandeza. Extrair a raiz quadrada mantém os valores dentro da faixa de 0 a 255.

Para a integração dos dados dos canais P e S_3 foi levado em conta que há menos correlação que entre dados dos canais P, S_1 e S_2 .

Concluiu-se neste estudo que há possibilidade de incrementar a resolução espacial dos canais modo multiespectral do satélite SPOT, criando-se um produto bastante similar a uma fotografia aérea falsa cor.

Em trabalho realizado por Essadik, (1987), com o objetivo de executar mapeamentos topográficos foram usados dados HRV-spot, nível 1B. Dados do nível 1B possuem correções radiométricas e correções geométricas: de efeito de rotação e curvatura da Terra, ângulo de visada, registro e outros.

Foram efetuadas correções atmosféricas através do uso de um modelo, sendo a contribuição estimada da atmosfera, subtraída do valor de cada pixel.

As imagens do modo pancromático e multiespectral deste estudo foram adquiridas no mesmo momento. Mesmo assim houve necessidade de efetuar registro com auxílio de pontos de controle. A imagem base usada foi do canal pancromático sendo ajustados os canais do modo multiespectral.

O processo de reamostragem empregado foi o do vizinho próximo. Sua utilização deveu-se a facilidade de execução.

O objetivo principal deste experimento foi o aprimoramento visual da imagem, usando técnicas de realçamento que a tornassem mais precisa e fácil de interpretar.

CAPITULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo discutiremos os princípios que descrevem a formação de um elemento de imagem. A partir destes princípios, do modelo da aquisição e de dados do sensor criaremos equações relacionando os valores existentes com os que pretendemos estimar. Para obtermos mais relações necessárias à solução do problema, e simultaneamente obtermos compatibilização de escala, executaremos uma reamostragem espacial e filtragens adaptativas.

Os dados obtidos com esse procedimento serão usados para montarmos um conjunto de equações, cuja solução nos fornecerá valores que compõem uma imagem com elementos de dez metros, em três canais distintos.

Para efeito de comparação, executaremos o processo de fusão de imagens criado por Cliche et al. (1985), e também o método de transformação 'IHS', nos moldes do experimento realizado por Dutra et al. (1988).

4.1 - MODELO FISICO/MATEMATICO DA AQUISIÇÃO DA IMAGEM

Quando uma feição do terreno é imageada por um sensor remoto, como o 'HRV' do satélite SPOT, os valores obtidos para cada elemento de imagem (pixel), em cada canal, estão relacionados essencialmente com a reflectância do alvo, iluminação e características do próprio sensor.

Existem relações entre as propriedades do alvo e os valores dos elementos de cena em cada canal. Quando temos canais em que há sobreposição de faixas espectrais, ou seja, duas ou mais bandas

com sensibilidade para mesmos comprimentos de onda, há relações entre os valores dos pixels de um canal e de outro. No caso do sensor 'HRV', SPOT o valor que determinado elemento de cena assume no canal 'P' está ligado aos valores deste elemento nos canais 'Sn'. Se conseguirmos equacionar essas relações poderemos obter resultados em que as informações dos canais SPOT estarão apresentadas numa só imagem.

A montagem do sistema de equações terá como objetivo a obtenção de uma solução que seja um bom estimador para três canais com dez metros de resolução espacial. Para começarmos a montagem das equações vejamos os fatores determinantes do valor de um elemento de imagem.

4.1.1 - VALOR DO ELEMENTO DE IMAGEM PARA UMA SUBCENA

Um canal 'n' do instrumento 'HRV' do satélite SPOT é do ponto de vista radiométrico, caracterizado por uma sensibilidade espectral $S_n(\lambda)$. Quando o instrumento observa uma cena de radiância espectral $L(\lambda)$, fornece uma saída Y_n proporcional à quantidade L_n definida por:

$$L_n = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) \cdot R_n(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} R_n(\lambda) d\lambda}, \quad (4.1)$$

dita radiância equivalente na banda 'n' (Begni et al. 1985).

O valor fornecido pelo sensor (número entre 0 e 255), para cada elemento de terreno (i,j), em cada canal ($Y_{n|j}$), dependerá: das características dos detetores CCD; ganho (Cg), corrente de obscuridade do detector (Cr); do ganho do amplificador (G); do ganho

do conversor análogo-digital (A_g); da corrente de obscuridade do detector (ϵ), e da radiancia, $L(n)_{IJ}$

Assim temos:

$$Yn_{IJ} = A_g \cdot L(n)_{IJ} \cdot G \cdot C_g + G \cdot C_r + \epsilon , \quad (4.2)$$

Esta equação pode ser simplificada para:

$$Yn_{IJ} = F_n \cdot L(n)_{IJ} + \epsilon , \quad (4.3)$$

onde F_n é o fator que incorpora os efeitos de ganho.

Tomando-se a Equação (4.3) vemos que o valor de saída de cada pixel é dependente da radiancia e de um coeficiente 'F' para um canal 'n'

Para montarmos com simplicidade as equações matemáticas que suportem nosso modelo físico, faremos aproximações expeditas para o fator F_n . Essas aproximações serão baseadas em análise das áreas das curvas de responsividade espectral simplificadas, para cada canal. Isto será executado desta forma uma vez que não é objetivo deste trabalho detalhar e obter com precisão valores tais como: dispersão de responsividade espectral entre detectores, variação de transmitância do divisor de feixe, ruído intrínseco ao detector, entre outros.

Como consequência deste procedimento poderemos perder alguma precisão radiométrica em nossos resultados, porém isto não afetará a implementação e teste do método.

4.1.2 - MODELO FÍSICO

A cena que se pretende estimar com três canais e resolução espacial de 10 metros está representada na Figura (4.1), onde x_1^1 representa o valor do pixel superior a esquerda, no canal E_1

A Figura 4.1 esquematiza uma subcena. São apresentados três canais, com resolução espacial de dez metros, cujos valores serão relacionados com os dados disponíveis, ou seja: um canal pancromático, com resolução espacial de dez metros, e três canais multiespectrais , com resolução de vinte metros.

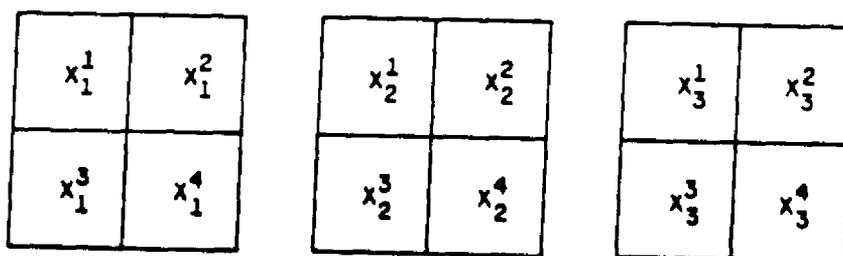


Fig. 4.1 - Subcena em três canais virtuais com resolução espacial 10 metros.

Temos então para a subcena em foco a imagem:

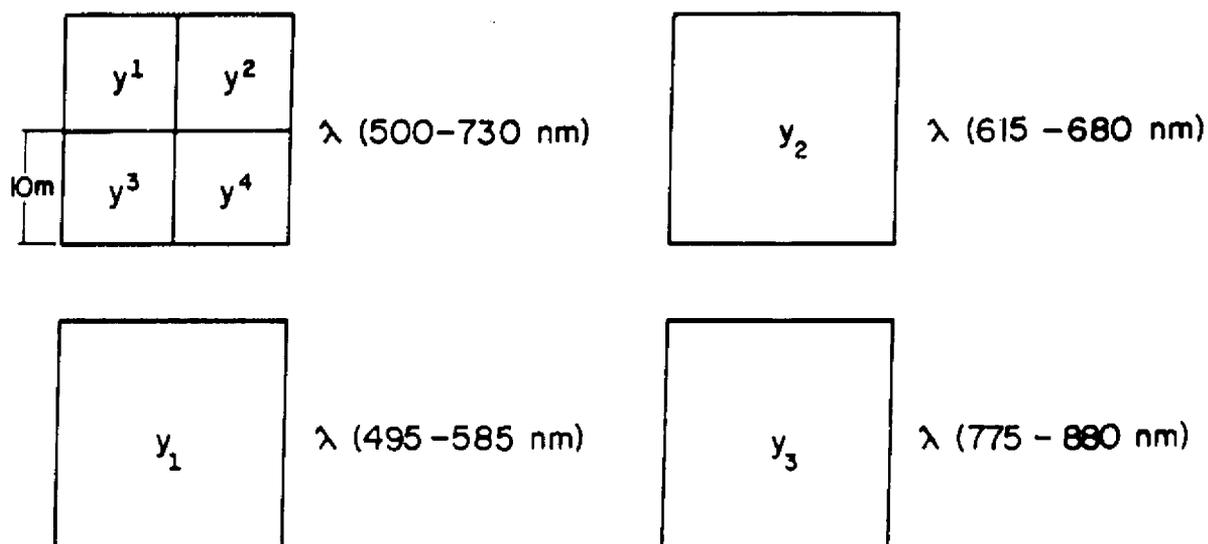


Fig. 4.2 - Representação da imagem gravada pelo sensor HRV - SPOT. y^1 representa o valor do pixel 1 (um) no canal P, y_1 o valor do pixel no canal S_1 e assim sucessivamente.

FONTE: Corlay et al. (1984).

Os dados de que dispomos são os valores dos pixels nos canais P, S_1 , S_2 e S_3 ; e curvas de responsividade para cada faixa do sensor HRV-SPOT.

Os dados que queremos obter terão uma delimitação virtual de faixa espectral, conforme nosso interesse. Para termos faixas bem separadas, cujas informações espectrais tenham relação com os dados SPOT, modo multiespectral, utilizaremos os seguintes limites:

Canal E_1 480 a 600 nm ;

Canal E_2 600 a 740 nm ;

Canal E_3 740 a 920 nm .

Existem relações entre os valores registrados pelo satélite SPOT e os valores que desejamos obter. Não sabemos ainda medir estas relações. Vamos equacioná-las usando fatores que tentaremos determinar.

O nível de cinza registrado pelo sensor para o pixel y_1 está relacionado com o valor que pretendemos estimar para os elementos x^1 (primeira posição, canais E_n) e com a responsividade espectral do canal P do sensor HRV. Esse valor é resultado de uma combinação dos valores dos três canais que serão estimados. Podemos dizer que:

$$y^1 = \alpha x^1_1 + \beta x^1_2 + \delta x^1_3 , \quad (4.4)$$

Isto quer dizer que o valor que temos para um determinado ponto no canal P está relacionado com os valores deste mesmo ponto nos canais a serem estimados por fatores α , β , δ .

Para os pixels y^2 , y^3 , y^4 respectivamente:

$$y^2 = \alpha x^2_1 + \beta x^2_2 + \delta x^2_3 , \quad (4.5)$$

$$y^3 = \alpha x^3_1 + \beta x^3_2 + \delta x^3_3 , \quad (4.6)$$

$$y^4 = \alpha x^4_1 + \beta x^4_2 + \delta x^4_3 , \quad (4.7)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, tomando porém cada quatro valores, que geometricamente coincidem com os 'pixels' gravados nos canais S_n , teríamos novas relações:

$$y_1 = \theta(x_1^1 + x_1^2 + x_1^3 + x_1^4) + \varphi(x_2^1 + x_2^2 + x_2^3 + x_2^4) + \\ + \gamma(x_3^1 + x_3^2 + x_3^3 + x_3^4), \quad (4.8)$$

$$y_2 = \epsilon(x_1^1 + x_1^2 + x_1^3 + x_1^4) + \Omega(x_2^1 + x_2^2 + x_2^3 + x_2^4) + \\ + \delta(x_3^1 + x_3^2 + x_3^3 + x_3^4), \quad (4.9)$$

$$y_3 = \zeta(x_1^1 + x_1^2 + x_1^3 + x_1^4) + \eta(x_2^1 + x_2^2 + x_2^3 + x_2^4) + \\ + j(x_3^1 + x_3^2 + x_3^3 + x_3^4), \quad (4.10)$$

Como resultado da montagem das Equações (4.4) a (4.10) temos doze fatores a serem definidos e doze incógnitas. As doze incógnitas representam os valores de cada 'pixel' de 10 metros de resolução espacial, em tres canais.

4.1.3 - DETERMINAÇÃO DOS FATORES DO SISTEMA DE EQUAÇÕES.

Para definir os fatores constantes do modelo matemático, consideraremos as bandas a serem criadas com limites de sensibilidade espectral próximos aos limites das bandas S_1 , S_2 e S_3 . Para determinar os valores dos fatores serão usadas curvas de responsividade espectral de todos os canais

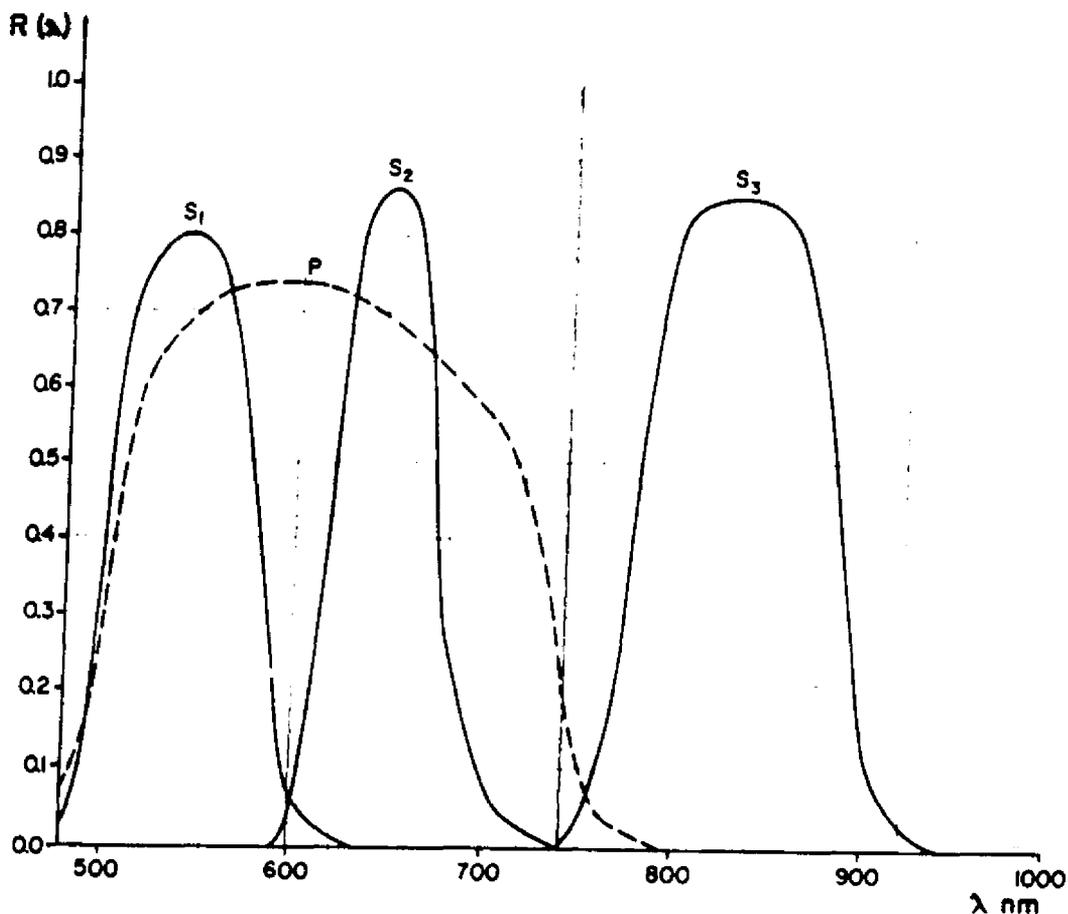


Fig 4.3 - Curvas de responsividade espectral dos canais P, S₁, S₂ e S₃ do sensor HRV, satélite SPOT.

FONTE: Corlay et al. (1984).

Na Equação (4.4) o fator α pode ser inferido a partir da comparação: da área da curva de responsividade espectral do canal P, compreendida no intervalo dos limites inferior e superior de comprimento de onda dos canais a serem estimados, e área total da curva de responsividade espectral do canal P (Figura 4.3). Em outras palavras, os valores de cada ponto, no canal P, foram relacionados aos valores do mesmo ponto nos canais a serem estimados. A parametrização desta relação foi obtida com a extração das áreas das curvas de

responsividade espectral com planímetro de precisão e cálculo de razão (Fig. 4.3 e Tab. 4.1).

TABELA 4.1

ÁREAS DAS CURVAS DE RESPONSIVIDADE ESPECTRAL DOS CANAIS P, S₁, S₂ E S₃: TOTAL E NOS LIMITES DAS FAIXAS DOS CANAIS VIRTUAIS.

CANAL/FAIXA	ÁREA - cm ²
S ₁	16,3
S ₂	13,5
S ₃	24,1
P	40,2
S ₁ ∩ E ₁	16,2
S ₁ ∩ E ₂	0,3
S ₂ ∩ E ₂	13,4
S ₃ ∩ E ₃	24,0
P ∩ E ₁	17,3
P ∩ E ₂	22,4
P ∩ E ₃	0,7

A soma das áreas comuns a cada canal original e aos canais virtuais deveria ser igual à área do canal original. Isto não ocorre por imprecisões inerentes à medição de áreas de gráficos e estarmos usando apenas um decimal significativo.

Assim, vemos que para formação do valor y^1 (canal pancromático), houve uma contribuição de 0,433 da radiancia, do alvo, compreendida na faixa virtual de sensibilidade do canal E_1 . O fator α foi obtido com a razão entre os valores 17,3 e 40,2 da Tabela 4.1, resultando em 0,433. O fator β foi obtido com a razão

entre os valores 22,4 e 40,2 da Tabela 4.1. O fator δ terá o valor 0,017 obtido pela razão entre os valores 0,7 e 40,2.

Obteríamos com esses termos a equação:

$$y^i = 0,433 x^i + 0,559 x^i + 0,017 x^i, \quad (4.11)$$

onde $i = 1, 2, 3, 4$.

Para a Equação (4.8) temos que o valor do pixel y_1 no canal S_1 é uma combinação das radiancias dos quatro elementos de cena dentro da faixa de sensibilidade da banda. Pelas curvas de responsividade do canal S_1 e limites dos canais a serem estimados (Fig. 4.3) concluímos que o valor de y_1 é um somatório da contribuição dos elementos de cena, essencialmente na faixa do canal E_1 .

A parametrização desse valor dá-se pela comparação da área da curva de responsividade espectral do canal S_1 , compreendida no intervalo dos limites inferior e superior de comprimento de onda dos canais E_1, E_2 e E_3 , e área total da curva de responsividade espectral do canal S_1 .

Conforme os dados da Tabela 4.1 e Figura 4.3, foi obtido para ϕ o valor 0,994, que é a razão entre a área da curva de responsividade espectral do canal S_1 , compreendida nos limites do canal E_1 e área da curva de responsividade espectral do canal S_1 . Esse valor é dividido por 4 por estarmos trabalhando com valores normalizados (0 a 255) de quatro elementos. Os fatores ψ e γ recebem o valor 0 (zero) por não haver quantidade mensurável de sensibilidade do canal S_1 nos limites E_1 .

Seguindo este mecanismo obteríamos o valor 0,248 para Ω e 0,249 para J , o valor zero para ϵ, ∂, ξ e η completando as equações para os canais do modo multiespectral.

A soma dos fatores em cada equação deveria ser um, uma vez que estamos tratando com razões entre áreas de partes da curva

área total da curva, para cada canal. Devido a erros de medição de áreas e aproximações, este fato não ocorre de maneira sistemática. A utilização das áreas das curvas de responsividade espectral é uma maneira de abstrair as seguintes equações:

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1 E_1}^{\lambda_2 E_1} R_P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 P}^{\lambda_2 P} R_P(\lambda) d\lambda} = \frac{17,3}{40,2} = 0,433, \quad (4.12)$$

$$\beta = \frac{\int_{\lambda_1 E_2}^{\lambda_2 E_2} R_{S1}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 P}^{\lambda_2 P} R_P(\lambda) d\lambda} = \frac{22,4}{40,2} = 0,559, \quad (4.13)$$

$$\delta = \frac{\int_{\lambda_1 E_3}^{\lambda_2 E_3} R_P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 P}^{\lambda_2 P} R_P(\lambda) d\lambda} = \frac{0,7}{40,2} = 0,017, \quad (4.14)$$

$$\vartheta = \frac{\int_{\lambda_1 E_1}^{\lambda_2 E_1} R_{S1}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 S_1}^{\lambda_2 S_1} R_{S1}(\lambda) d\lambda} = \frac{16,2}{16,3} = 0,994, \quad (4.15)$$

$$\psi = \frac{\int_{\lambda_1 E_2}^{\lambda_2 E_2} R_{S1}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 S_1}^{\lambda_2 S_1} R_{S1}(\lambda) d\lambda} = \frac{0,3}{16,3} = 0,018, \quad (4.16)$$

$$\gamma = \frac{\int_{\lambda_1 E_3}^{\lambda_2 E_3} R_{S1}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 S_1}^{\lambda_2 S_1} R_{S1}(\lambda) d\lambda} = \frac{0}{16,3} = 0, \quad (4.17)$$

$$\Omega = \frac{\int_{\lambda_1 E_2}^{\lambda_2 E_2} R_{S2}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 S_2}^{\lambda_2 S_2} R_{S2}(\lambda) d\lambda} = \frac{13,4}{13,5} = 0,993, \quad (4.18)$$

$$J = \frac{\int_{\lambda_1 E_3}^{\lambda_2 E_3} R_{S3}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 S_3}^{\lambda_2 S_3} R_{S3}(\lambda) d\lambda} = \frac{24}{24,1} = 0,996, \quad (4.19)$$

$\epsilon, \delta, \zeta, \eta = 0$ (numerador = 0, como em (4.17))

Até aqui construímos equações com dados fornecidos pelo sensor HRV - SPOT e dados de performance do sistema. Temos sete equações e doze incógnitas. A subdeterminação do sistema impede sua solução. Para eliminarmos este problema criaremos novas equações como veremos no tópico seguinte.

4.2 - REAMOSTRAGEM DOS CANAIS MULTIESPECTRAIS

A utilização de características do sensor e padrão de curvas de responsividade espectral dos diferentes canais possibilitou a montagem de equações que relacionam os valores fornecidos pelo sensor com os valores para três canais virtuais.

Levaremos em consideração, a partir deste ponto, a relação existente, dentro de uma mesma banda, entre os valores de um pixel e o valor dos pixels vizinhos. Relação esta surgida devido às características de geometria da cena, quando certas feições do terreno se estendem aos vizinhos do elemento de imagem. A física, quando efeitos de difração e espalhamento introduzem modificações no sinal recebido pelo detector, também justifica a consideração das vizinhanças de um elemento no processo de criação de um modelo de imageamento.

Para a formação de uma imagem a cena sofre uma transformação dependente das características do aparato óptico. Podemos dizer que nessa transformação ocorre um processo de filtragem passa baixa, uma vez que frequências espaciais altas são atenuadas ou perdidas. Este fenômeno é característico de qualquer sensor, sendo mormente avaliado em termos de resolução espacial.

Mesmo que conhecessemos perfeitamente a função de transformação do aparato óptico, seria impossível o retorno à cena real, efetuando a operação inversa. Isto ocorre uma vez que, características de determinada frequência, acima da frequência de corte, são definitivamente perdidas. Outro fator limitante é a existência de ruído na imagem, fato que estabelece um novo limite de frequência, degradando os resultados.

Apesar dessas limitações é possível realçar imagens, corrigindo (em parte) efeitos degradantes, através de filtrações espaciais.

A transformação da imagem, submetida a uma filtragem espacial, ocorre elemento a elemento. Influem no resultado, além do nível de cinza do pixel sendo processado, os níveis de cinza dos pixels vizinhos.

Quanto às interações do filtro com os elementos de imagem podemos classifica-las em "passa baixa", "passa alta" e "passa banda" conforme realcem: as baixas frequências, altas frequências ou janelas de frequências.

A filtragem espacial pode ser usada como forma de ressaltar limites, atenuar ruídos ou realçar formas. Há, porém, limitações em seu emprego no que se refere à dimensão do suporte da função que se pretende convoluir. Um guia, para escolha entre filtragem espacial e processamento no domínio da frequência (Fourier), é usar convolução espacial, se a função de espalhamento pontual tiver suporte de dimensão 7 x 7 ou menor e, filtragem no domínio da frequência para outros casos (Pratt, 1978).

O processo de movimentar uma janela pela imagem, extraíndo a média ponderada da vizinhança do pixel sendo processado, representa uma boa solução para a implementação de um filtro espacial.

A escolha dos pesos da janela pode vir a privilegiar o realce de feições em determinada direção. Vejamos uma maneira de obtermos valores, para a janela, levando-se em conta atributos espaciais de cena.

4.2.1 - MODELO FISICO DA REAMOSTRAGEM

No caso do sensor HRV do satélite SPOT cada elemento da imagem representa uma área de 10 x 10 m, no módulo pancromático e uma área de 20 x 20 m no módulo multiespectral.

Consideremos que os elementos de cena têm 10 x 10 m, que é a resolução da qual queremos nos aproximar, tratando os dados dos canais do módulo multiespectral.

Três métodos são empregados usualmente para reamostragem: vizinho próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

No processo de reamostragem "vizinho próximo" o valor de cada elemento da imagem é duplicado. Na interpolação bilinear são considerados os quatro valores que circundam o elemento a ser criado. No processo de convolução cúbica são usados dezesseis elementos circundantes.

Para interpretação visual o processo de convolução cúbica é o mais indicado havendo, porém, a criação de distorções radiométricas.

Para reamostrar estas imagens, sem utilização de informações externas, efetuaremos filtragens, levando em conta as influências dos pixels vizinhos, na formação de cada valor. Serão privilegiadas quatro direções nessas filtragens; conforme a posição do pixel a ser criado no processo de montagem das quatro subcenas.

Este processo será equivalente a dois tratamentos: reamostragem "vizinho próximo" e filtragens direcionais. Nas filtragens serão usados os valores dos elementos de cenas e pesos relacionados com a geometria da imagem.

A distância entre o centro dos pixels na imagem original, 20 x 20 m, e o centro do pixel a ser estimado é fator importante na formação do seu valor, uma vez que, espera-se alguma coerência espacial na cena (correlação radiométrica entre pixels vizinhos). A lógica geométrica deste procedimento tem também sustentação no fato de que, na formação da imagem, a função de transferência óptica tem um domínio sobre área maior que o elemento de imagem ou seja, respostas da vizinhança influem no valor radiométrico do pixel devido a efeitos ópticos de desfocagem e eletrônicos de varredura.

A partir da imagem de um canal multiespectral, representada na Figura 4.4, criaremos uma nova imagem (dita reamostrada) cujos pixels representam um elemento de cena de tamanho menor.

O procedimento será idêntico para todos os canais multiespectrais. Assim temos representada na Figura 4.4 uma subcena de um canal multiespectral, com elementos de tamanho $2a$.

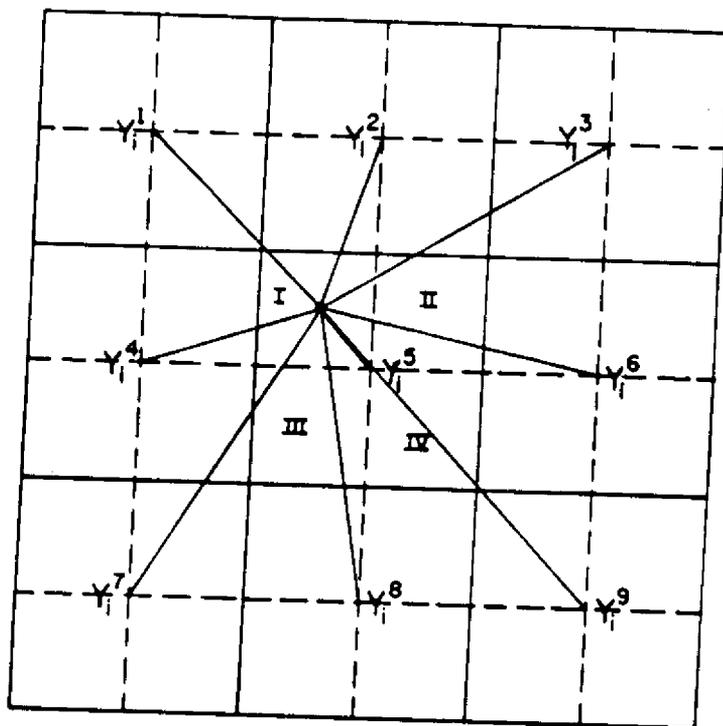


Fig 4.4 - Vizinhança do pixel $Y_{(1,J)}$.

Na Figura 4.4 as linhas cheias representam os limites dos pixels de 20 m e as linhas vazadas os novos pixels criados: y^J é o valor radiométrico do pixel na posição 'J'.

Focalizando nosso interesse ao pixel y^5 da cena, criamos quatro divisões, que serão os pixels da imagem reamostrada. O valor radiométrico de cada um desses novos pixels dependerá da influência de seus vizinhos na sua formação. Essa influência será considerada como inversamente proporcional à distância do centro de cada elemento primitivo ao centro do elemento sendo criado.

Para o caso do elemento I temos: distância do centro de I ao centro de y^1 ($i = 1,9$):

$$\text{distância } d(I, y^1) = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \sqrt{2} \right] a = 2,1 a , \quad (4.20)$$

$$d(I, y^2) = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2} a = 1,6 a , \quad (4.21)$$

$$d(I, y^3) = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} a = 2,9 a , \quad (4.22)$$

$$d(I, y^4) = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2} a = 1,6 a , \quad (4.23)$$

$$d(I, y^5) = \sqrt{\frac{2}{2}} a = 0,7 a , \quad (4.24)$$

$$d(I, y^6) = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} a = 2,5 a , \quad (4.25)$$

$$d(I, y^7) = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} \quad a = 2,9 a , \quad (4.26)$$

$$d(I, y^8) = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} \quad a = 2,5 a , \quad (4.27)$$

$$d(I, y^9) = \sqrt{2\sqrt{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}} \quad a = 3,5 a , \quad (4.28)$$

a = lado do pixel reamostrado (10 m)

Sendo a contribuição de cada elemento inversamente proporcional a estas distâncias temos as contribuições:

- do elemento $y^1 = 0,1$
- do elemento $y^2 = 0,13$
- do elemento $y^3 = 0,07$
- do elemento $y^4 = 0,13$
- do elemento $y^5 = 0,29$
- do elemento $y^6 = 0,08$
- do elemento $y^7 = 0,07$
- do elemento $y^8 = 0,08$
- do elemento $y^9 = 0,05$

Esses valores foram obtidos através de uma razão proporcionalmente inversa aos valores de distância, calculados normalizados para soma um.

O novo valor radiométrico para o pixel I será então:

$$\begin{aligned} \text{valor de I} = & 0,1y^1 + 0,13y^2 + 0,07y^3 + 0,13y^4 + 0,29y^5 + 0,08y^6 + \\ & + 0,07y^7 + 0,08y^8 + 0,05y^9, \end{aligned} \quad (4.29)$$

Efetuadao procedimento semelhante para os elementos II, III e IV temos os valores:

$$\begin{aligned} \text{valor de II} = & 0,07y^1 + 0,13y^2 + 0,1y^3 + 0,08y^4 + 0,29y^5 + 0,13y^6 + \\ & + 0,05y^7 + 0,08y^8 + 0,07y^9, \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \text{valor de III} = & 0,07y^1 + 0,08y^2 + 0,05y^3 + 0,13y^4 + 0,29y^5 + 0,08y^6 + \\ & + 0,1y^7 + 0,13y^8 + 0,07y^9, \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \text{valor de IV} = & 0,05y^1 + 0,08y^2 + 0,07y^3 + 0,8y^4 + 0,29y^5 + 0,13y^6 + \\ & + 0,07y^7 + 0,13y^8 + 0,1y^9, \end{aligned} \quad (4.32)$$

Uma maneira prática de realizarmos as operações determinadas consiste em criar filtros que efetuarão a convolução da imagem em quatro passagens distintas sobre a original. Para o caso dos elementos I teremos a seguinte máscara:

$$F I = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 10 & 13 & 7 \\ 13 & 29 & 8 \\ 7 & 8 & 5 \end{bmatrix}$$

para os elementos II

$$F \text{ II} = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 7 & 13 & 10 \\ 8 & 29 & 13 \\ 5 & 8 & 7 \end{bmatrix}$$

para os elementos III

$$F \text{ III} = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 7 & 8 & 5 \\ 13 & 29 & 8 \\ 10 & 13 & 7 \end{bmatrix}$$

para os elementos IV

$$F \text{ IV} = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 5 & 8 & 7 \\ 8 & 29 & 13 \\ 7 & 13 & 10 \end{bmatrix}$$

Para implementarmos essas filtragens montaremos algoritmos que:

- a) filtrem o arquivo original dando origem a quatro novos arquivos;
- b) montem um novo arquivo, com o quádruplo de endereços do arquivo original, onde os resultados do filtro F I ocuparão linhas e colunas ímpares; do filtro F II linhas ímpares, colunas pares; do filtro F III, linhas pares, colunas ímpares; do filtro F IV, linhas e colunas pares. (Algoritmo no Apêndice A).

O novo arquivo será uma imagem reamostrada com elementos de resolução espacial de 10 metros. Os valores obtidos para cada elemento serão utilizados no sistema de equações apresentado em 4.33 como valores auxiliares.

A aplicação desses filtros não introduzirá modificações na média e variância dos valores dos elementos do canal reamostrado, como vemos na Figura 4.5 (a e b), havendo, no entanto, um efeito "passa baixa".

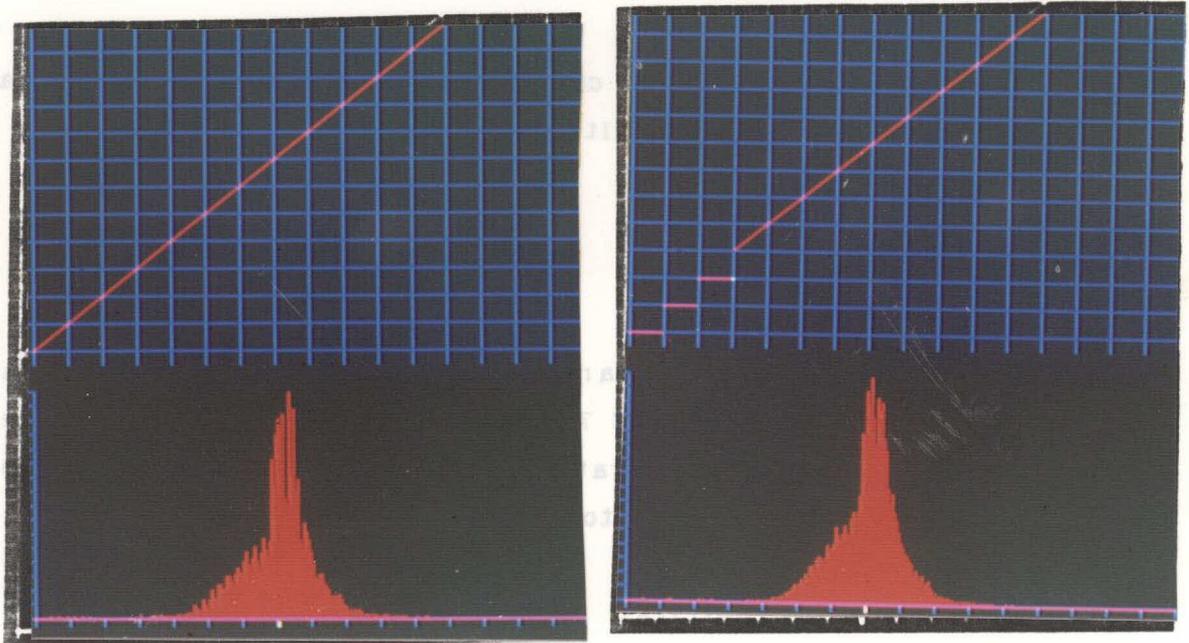


Fig 4.5 - Histogramas do canal S_3 original (a) e com filtragem direcional (b).

Poderíamos ter usado um outro processo de reamostragem, como a bilinear. Neste caso somente quatro valores de pixel seriam considerados para os cálculos e teríamos uma janela 2×2 .

A aplicação dessas filtragens e recomposição da imagem reamostrada nos forneceu doze novos valores. Estes valores completarão o sistema que havíamos deixado de solucionar no tópico

anterior (4.1) por estar subdeterminado. Esses resultados serão também usados para os testes de fusão que serão realizados para comparação entre métodos.

4.2.2 - IMPLEMENTAÇÃO DA REAMOSTRAGEM

Para concretizar o processo discutido foram efetuadas quatro cópias de cada canal Sn da subcena. Estes canais foram processados, pelas diferentes janelas do algoritmo "Filtragem Espacial" implementado no Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM) desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE.

Estes canais foram computacionalmente montados com a utilização de programa, cujo algoritmo é apresentado no Apêndice A.

4.3 - MATERIAL

Os dados SPOT, canal P, foram extraídos da cena abrangida pela órbita ponto WRS 716-397, obtidos em 4 de abril de 1986, nível 1B. Na fase de pré-tratamento dos dados, neste nível, são realizados os seguintes tratamentos (Begni et al. 1985):

- a) Correções radiométricas de equalização de resposta dos detectores.
- b) Correções geométricas visando correção de erros sistemáticos como a curvatura da Terra e ângulo de visada

As coordenadas de imagem da área escolhida, tendo ao centro o aeroporto de Cumbica, foram: pixels 4584 a 6036, linhas 1244 a 2568.

Os dados dos canais S_n , foram extraídos da cena abrangida pela órbita/ponto WRS 716-397, obtidos em 12 de maio de 1987. O nível de correção dos dados também é 1B.

As coordenadas de imagem da área escolhida, tendo ao centro o aeroporto de Cumbica, foram: pixels 1980 a 2715, linhas 564 a 1254.

Foi utilizado, para algumas operações com dados digitais o SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens), desenvolvido pelo INPE. Este sistema consiste num pacote de programas interativos baseando em microcomputadores. Os algoritmos usados foram: "Display de Imagens, Tratamento de Imagens, Filtragem, Registro, IHS".

Os algoritmos desenvolvidos para os testes e execução do trabalho dissertado são compatíveis com o SITIM.

Os resultados finais foram obtidos com a utilização de um aparato de gravação de imagens em filme denominado "REMBRANDT". Este equipamento consiste num dispositivo que expõe o filme a uma tela plana, monocromática, de alta resolução, através de filtros.

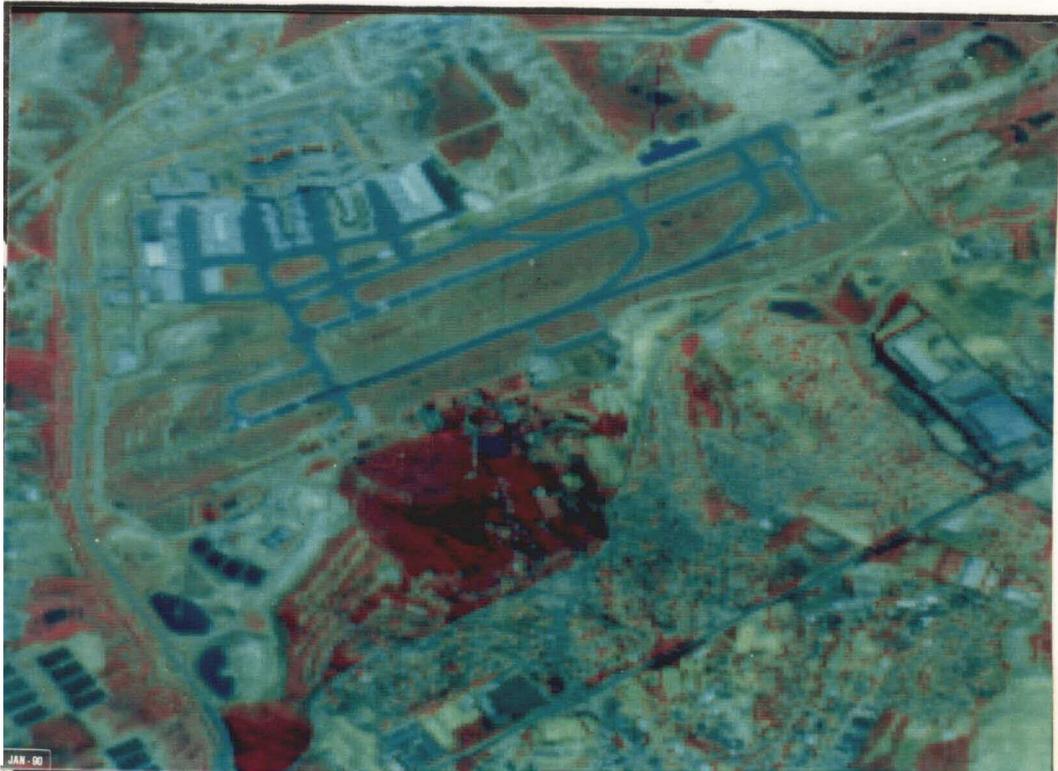


Fig. 4.6 - Subcena SPOT, canais S_1 , S_2 , e S_3 ; composição RGB.



Fig. 4.7 - Subcena SPOT, canal P.

4.4 - REGISTRO DOS CANAIS REANOSTRADOS E CANAL P

Como podemos ver na figura 2.2 e pela descrição do sensor HRV, o valor registrado pelos detetores do canal P e canais S_n são gerados por partes, geometricamente distintas do feixe incidente sobre o coletor da unidade de detecção. Em outras palavras, os canais P e S_n gravam, num dado tempo, valores de pontos distintos na cena, não podendo ser garantido o registro entre esses canais, mesmo com aquisição simultânea (Begni et al. 1985).

O produto utilizado para os testes neste trabalho tem uma grande defasagem temporal de aquisição, sendo maior ainda a necessidade de efetuar-se o registro geométrico dos canais.

Utilizou-se, para esse fim, um algoritmo implementado no SITIM.

A primeira etapa num processo de registro de imagens diz respeito à escolha de pontos de controle, que são feições passíveis de identificação precisa a nível de imagem. É importante observar-se que a quantidade de pontos de controle e sua distribuição sobre a imagem são parâmetros fundamentais para que se consigam bons resultados.

O algoritmo permite a definição do grau de polinômio em função do número de pontos de controle adquiridos. Um polinômio de primeiro grau requer um mínimo de 3 pontos (cada ponto definido por dois pares de coordenadas, um para cada canal) enquanto que um polinômio de segundo grau precisa de pelo menos 6 pontos. Com os 3 primeiros pontos adquiridos, resolve-se um polinômio de primeiro grau; quando são definidas as coordenadas do próximo ponto, o polinômio determinado inicialmente posiciona o cursor automaticamente sobre o ponto correspondente na imagem a ser ajustada facilitando o posicionamento final.

Foi tomada por base para o registro a sub-cena no canal multiespectral. Isto deveu-se ao fato de que os canais S_n já estão registrados entre si e há um número menor de dados a ser processado para o ajuste de imagem no canal pancromático.

Foram tomados onze pontos de controle distribuídos por toda a subcena. Não houve dificuldades na obtenção dos pontos, uma vez que a área de estudo é predominantemente urbana e: cruzamentos, marcação da pista de pouso e construções geométricas de alto contraste com o fundo são numerosos. Foi utilizado um polinômio de segundo grau no processamento e os resultados foram bastante satisfatórios.

Estando as imagens registradas e com os elementos com iguais atributos geométricos, passamos a executar testes com métodos já empregados com resultados positivos, como veremos a seguir.

4.5 - TESTE DE MÉTODOS DE FUSÃO ALTERNATIVOS

4.5.1 - MÉTODO DE DE CLICHE

Foi executado um experimento similar ao descrito no capítulo 3 (3.2), cujo objetivo era implementar a resolução espacial de dados SPOT, modo multiespectral, para a obtenção de um produto similar a uma fotografia aérea falsa cor (Cliche et alii, 1985).

O método foi implementado computacionalmente, sendo o algoritmo do programa "Fusão-CLICHE" apresentado no Apêndice B. Este programa lê quatro arquivos de imagem, ou seja, quatro bandas, executa as operações ponto a ponto entre os arquivos e forma uma imagem com três bandas RGB.

Utilizamos dados modo multiespectral, reamostrados e filtrados como descrito em 4.2. Estes dados já estavam registrados como descrito em 4.3.

O algoritmo testado gera os valores:

- a) $(P.S_1)^{1/2}$ para o azul (raiz quadrada do produto do nível de cinza (nc) canais P e P_1);
- b) $(P.S_2)^{1/2}$ para o verde (raiz quadrada do produto do nível de cinza (nc) canais P e P_2);
- c) $(0,25P+0,75S_3)$ para o vermelho.

Primeiramente tentou-se executar o procedimento com os dados originais, sem manipulação de contraste ou ajuste de ganho e offset. O resultado foi uma imagem de cores com pouco contraste. Isto pode ter ocorrido devido à diferença de média e variância dos valores dos canais P e S_n . Os dados modo multiespectral disponíveis tinham média baixa e pequena variância, diferentemente dos dados modo pancromático.

No segundo teste cada canal foi tratado isoladamente para igualar-se as médias dos níveis de cinza para aproximadamente 112 e aumentar-se as variâncias. Após este procedimento aplicou-se o algoritmo de fusão.

Os resultados foram bons tendo-se obtido um produto em cores similares às de uma fotografia aérea falsa cor, resolução espacial de 10 metros.

4.5.2 - TRANSFORMAÇÃO IHS

Utilizou-se para este teste os mesmos dados que para o anterior: canais multiespectrais com filtragens adaptativas e reamostragem; canal pancromático registrado ao multiespectral.

O artifício de fusão foi semelhante ao usado por Dutra (1988) descrito na Seção 3.1. A execução tem os seguintes passos:

- a) Rotação RGB - IHS onde os canais S_1 , S_2 e S_3 foram associados a R, G e B respectivamente
- b) Substituição do canal I, nos resultados obtidos, por P.
- c) Rotação IHS - RGB onde o canal I foi substituído por P.

Foi usado o algoritmo implementado no SITIM para esses tratamentos.

Os resultados obtidos foram bons sendo gerada uma imagem com boa definição geométrica e equilíbrio de cores.

4.6 - FUSÃO POR OPERADOR MATRICIAL

Tomaremos todos os dados produzidos até aqui e os disporemos na forma de um sistema de equações onde as incógnitas são os valores dos pixels de 10 metros, em três canais.

4.6.1 - MONTAGEM DAS EQUAÇÕES

Conforme foi visto na Seção 4.1 produzimos sete relações entre cada um dos valores fornecidos pelo sensor e os valores que pretendemos estimar (Equações 4.4 a 4.10).

Novas relações foram produzidas na Seção 4.2. Estas relações levaram em consideração a influência da vizinhança no valor de um pixel. Para aplicar-se esse conceito, reamostrou-se os canais multiespectrais transformando cada valor original em quatro valores novos. Cada valor de ponto nos canais S_n sofreu operações diferentes. Os resultados dessas operações são também estimadores dos valores que pretendemos obter. Estes estimadores serão também usados.

Tomando as Equações 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, e os resultados das operações executadas pelas Equações 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32, formamos o seguinte sistema:

$$\begin{array}{l}
 Y^1 = \alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ \beta \ 0 \ 0 \ 0 \ \delta \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^1_1 \\
 Y^2 = 0 \ \alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ \beta \ 0 \ 0 \ 0 \ \delta \ 0 \ 0 \quad X^2_1 \\
 Y^3 = 0 \ 0 \ \alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ \beta \ 0 \ 0 \ 0 \ \delta \ 0 \quad X^3_1 \\
 Y^4 = 0 \ 0 \ 0 \ \alpha \ 0 \ 0 \ 0 \ \beta \ 0 \ 0 \ 0 \ \delta \quad X^4_1 \\
 Y_1 = \theta \ \theta \ \theta \ \theta \ \varphi \ \varphi \ \varphi \ \varphi \ \gamma \ \gamma \ \gamma \ \gamma \quad X^1_1 \\
 Y_2 = \epsilon \ \epsilon \ \epsilon \ \epsilon \ \Omega \ \Omega \ \Omega \ \Omega \ \partial \ \partial \ \partial \ \partial \quad X^2_2 \\
 Y_3 = \xi \ \xi \ \xi \ \xi \ \eta \ \eta \ \eta \ \eta \ \jmath \ \jmath \ \jmath \ \jmath \quad X^3_2 \\
 Y^1_1 = 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^4_2 \\
 Y^2_1 = 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^1_3 \\
 Y^3_1 = 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^2_3 \\
 Y^4_1 = 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^3_3 \\
 Y^1_2 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \quad X^4_3 \\
 Y^2_2 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 Y^3_2 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 Y^4_2 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 Y^1_3 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 Y^2_3 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \\
 Y^3_3 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \\
 Y^4_3 = 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1
 \end{array}$$

As sete primeiras equações foram extraídas de características do sensor e as doze seguintes, de operações envolvendo a disposição geométrica dos elementos de cena.

Os dados que dispomos formam um vetor de dezenove elementos. As doze últimas linhas da matriz são linhas de uma matriz identidade, uma vez que os doze últimos elementos do vetor de dados são estimadores da imagem que queremos obter.

Este sistema pode ser apresentado como:

$$x = Ya \quad (4.33)$$

o qual passamos a resolver matematicamente.

4.6.2 - SOLUÇÃO PARA O SISTEMA

No caso em estudo "a" representa o vetor imagem que se quer obter, com resolução espacial incrementada e informações em três canais.

A matriz "Y" representa os efeitos (ou operações) pelos quais passaram os dados. As transformações sofridas pelo sinal de entrada resultaram no vetor de saída "x", que são os dados obtidos pelo sensor "HRV" do satélite SPOT, com seus atributos característicos (sete primeiros elementos), e dados obtidos com a reamostragem das imagens multiespectrais (doze elementos restantes).

Ao resolvermos o conjunto de equações, estaremos "restaurando" a imagem, pois foram levados em consideração os efeitos que ordenaram a transformação da cena em imagem e a coerência geométrica de distribuição dos níveis de radiância de cena. Os resultados do conjunto de equações serão dados de novos canais com atributos espaciais e espectrais diferentes do original.

No sistema em estudo temos 19 equações e 12 incógnitas (matriz Y, Apêndice C).

Multiplicando ambos os termos da equação 4.33 por $Y^T.M$ (12 x 19), temos:

$$Y^T.M x = Y^T M Y a , \quad (4.34)$$

Onde "M" é uma matriz quadrada (19 x 19), diagonal, cujos elementos ponderam as contribuições de cada equação do sistema (matriz M, Apêndice C).

Os elementos da diagonal da matriz M são dependentes do fator ν , o qual rege as seguintes relações:

$$m = \frac{\nu}{7} ;$$

$$n = \frac{1 - \nu}{12} ;$$

Serão adotados para ν os valores 0,7 e 0,5 e avaliados os resultados. Quanto mais próximo de 1 for ν , mais peso está sendo dado às sete primeiras equações; quanto mais próximo de 0 (zero), mais peso é dado às doze últimas.

Para cada valor de ν teremos um valor para 'm' e 'n'; fatores que obedecem as relações:

$$7m + 12n = 1 .$$

$$[M_{1j}] = \begin{cases} m; & \text{para } i = j \leq 7 \\ n; & \text{para } 7 < i = j \leq 19 \\ 0; & \text{para } i \neq j . \end{cases}$$

onde para $\nu = 0,7$; $m = 0,100$; $n = 0,025$.

para $\nu = 0,5$; $m = 0,071$; $n = 0,042$.

Tomando-se (4.34) e multiplicando-se ambos os termos por $(Y^TMY)^{-1}$.

$$(Y^TMY)^{-1} Y^TM x = a , \tag{4.35}$$

que solucionará o sistema , onde

$$[(Y^TMY)^{-1} Y^TM = Z, \quad (4.36)$$

sendo "Z" a pseudo inversa ponderada de Y (matriz Z, Apêndice C).

4.6.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORÍTHO

Estando criado um operador matricial de 12 linhas por 19 colunas, passou-se a estruturar um algoritmo para utiliza-lo.

Este algoritmo acessa sete arquivos extraíndo 19 elementos para compor o vetor (19 X 1) de entrada. Estes arquivos são:

a) Imagem modo pancromático, extraídos quatro valores por operação (1 arquivo).

b) Imagens modo multiespectral, extraídos três valores por operação (3 arquivos).

c) Canais multiespectrais, com filtragens adaptativas, extraídos quatro valores de cada canal (3 arquivos).

Após compor o vetor de entrada, o algoritmo efetua as operações de multiplicação matriz-vetor e endereça os resultados a três novos arquivos (quatro elementos em cada arquivo, a cada operação).

Podemos ver na figura 4.8, o esquema do algoritmo utilizado. A esquerda, temos os sete arquivos de entrada e o endereçamento dos valores para o vetor de entrada. Vemos as ligações de cada posição do vetor ao operador matricial, as ligações do operador matricial ao vetor resultado e ligações do vetor resultado aos arquivos imagem.

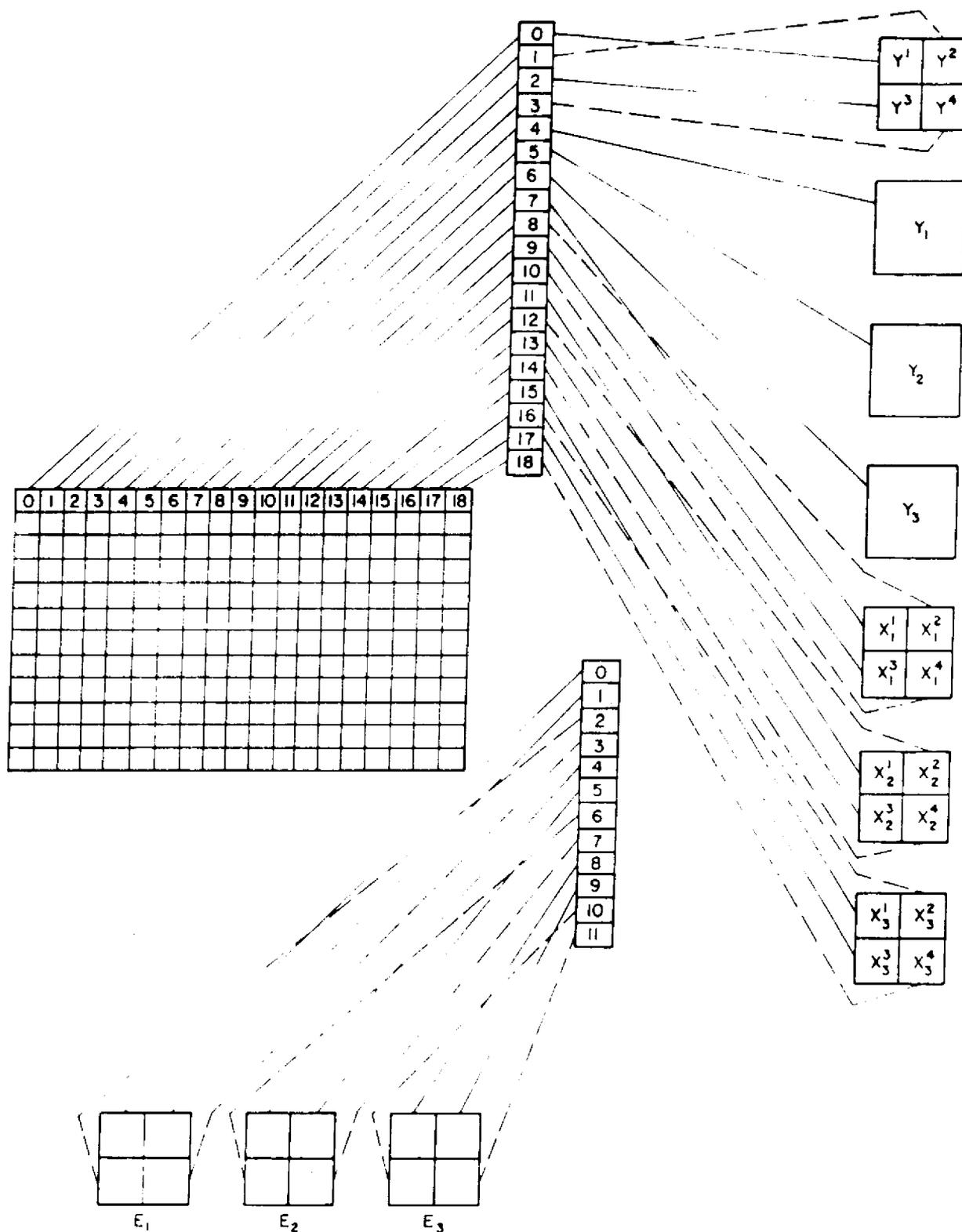


Fig. 4.6 - Esquema do algoritmo do operador matricial para simulação de 3 canais SPOT, com resolução de 10 m.

Os novos arquivos formam três canais, cujos valores de pontos constituem uma imagem com resolução geométrica de 10 metros e, espectral de três canais bem definidos.

Os resultados obtidos, a partir da aplicação dos métodos descritos no Capítulo 4, serão discutidos a seguir.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo discutiremos os resultados de cada etapa realizada na execução deste trabalho. O resultado de maior relevância é a obtenção de um operador matricial para fusão dos canais multiespectrais e pancromático do sensor HRV-SPOT, gerando três novas bandas, com resolução espacial próxima a dez metros.

Para chegarmos a este conjunto de dados, houve resultados parciais que merecem atenção:

- a) A reamostragem e filtrações adaptativas dos canais S_n .
- b) Os testes com o uso dos métodos de Cliche e transformações IHS.
- c) A função ponderadora da matriz M na inversão de matriz retangular, onde se quer atribuir maior peso a determinadas equações do conjunto.

5.1 - REAMOSTRAGEM E FILTRAGENS ADAPTATIVAS

O processo de passar as janelas adaptativas na área de domínio de imagem criando uma outra, com o dobro de linhas e de colunas, deu origem a canais com elementos de imagem de 10 metros, sem efeito de blocos, comum no processo de duplicação de pixels.

A passagem do filtro não acarreta em modificações na média dos valores dos elementos de cada canal.

Esses resultados parciais mostraram-se bastante úteis na execução dos testes de fusão.

5.2 - RESULTADOS DOS TESTES DE FUSÃO DOS MÉTODOS DE 'CLICHE' E 'IHS'

5.2.1 - MÉTODO DE 'CLICHE'

Primeiramente foi implementado o método de Cliche na forma em que o autor obteve os melhores resultados.

Assim sendo, foi implementado o algoritmo apresentado no Capítulo 3 (3.2), com a aplicação das multiplicações e extração da raiz quadrada, do dado original. Incrementos de ganho e "offset" so foram aplicados posteriormente.

Este procedimento teve resultados desvantajosos em relação ao posteriormente adotado, onde efetuou-se manipulação de contraste, visando melhorar a distribuição dos níveis de cinza nos diferentes canais, antes da aplicação do algoritmo. O objetivo de adotar este procedimento foi aproximar as médias dos valores dos "pixels" em cada banda.

Segundo o autor foram obtidos bons resultados com esse método. A imagem resultante tem muita semelhança a uma fotografia aérea falsa cor, sendo bem discerníveis, por exemplo, as diferentes densidades de cobertura vegetal.

As grandes feições urbanas são identificáveis. A pista do aeroporto de Cumbica é bem discernível sendo visíveis até mesmo as marcações de pista.

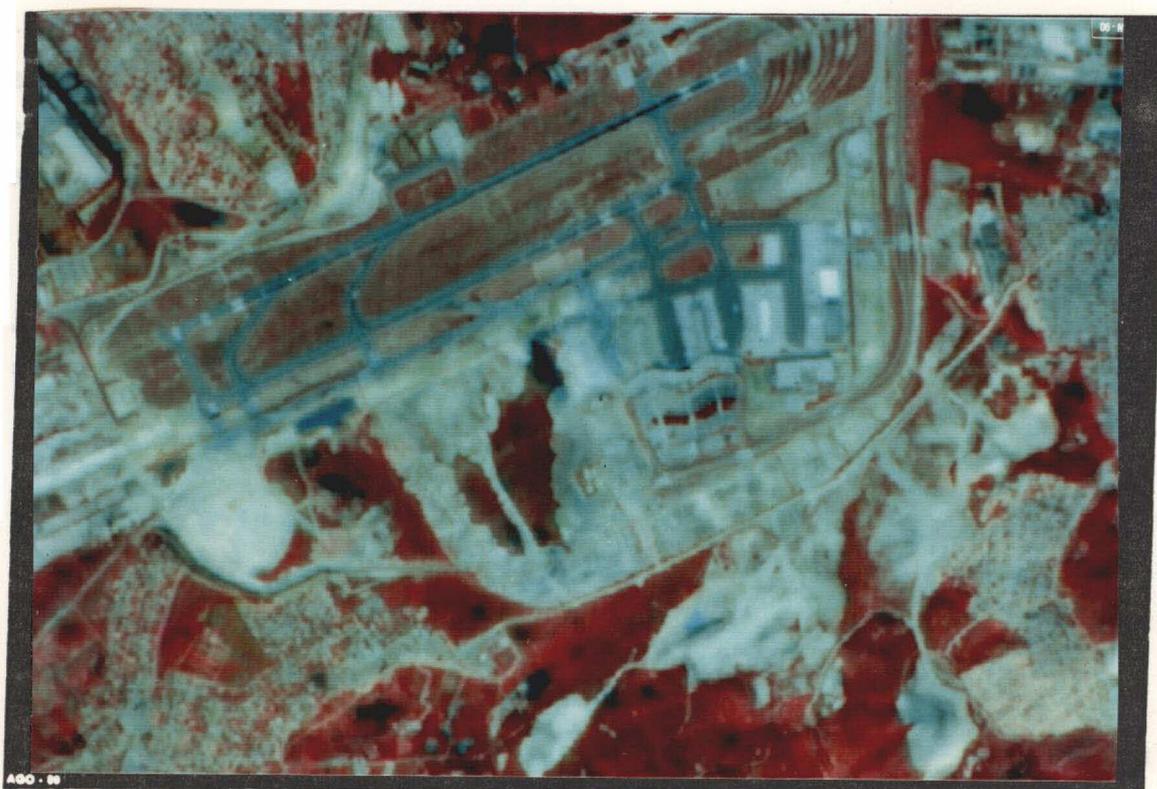


Fig. 5.1 - Aeroporto de Cumbica, imagem SPOT, canais P e S_n obtida por fusão - Método de Cliche.

O fato das imagens terem sido obtidas em épocas diferentes acarretou o aparecimento de manchas enevoadas. A imagem nas bandas S_n é cerca de um ano mais recente que a imagem modo P, havendo nos canais multiespectrais, entre outras mudanças temáticas, uma nova pista de taxi no aeroporto, e novas instalações. A existência de diferentes temas espacialmente coincidentes é o fator determinante no surgimento dessas 'manchas'.

Para utilização do método, em áreas caracterizadas por uma intensa dinâmica de ocupação, provavelmente modificações de pequena amplitude geométrica, que isoladamente são despercebidas, podem prejudicar, ainda que de maneira suave, os resultados.

A área processada tem aproximadamente 10 x 10 Km. Foi confeccionado um mosaico na escala 1:20.000, sendo necessários 12 módulos de tela com recobrimento entre si de 10%. A imagem foi

carregada na unidade de visualização (UVI) do SITIM, de modo a obter-se as escalas vertical e horizontal compatíveis, nos negativos. Desta forma, pode-se produzir imagens articuladas, com razoável precisão, às bases cartográficas, por meio de um ampliador convencional, de ajuste em um só eixo.

O tempo de processamento de quatro canais, de 1 mb cada, é de aproximadamente 30 minutos, estando os dados já registrados espacialmente.

2.2 - MÉTODO DE TRANSFORMAÇÕES IHS

Os resultados das transformações IHS, realizadas de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 4 (4.4.2), foram bons.

A imagem resultante apresentou-se com mais contraste que a obtida pelo método de Cliche, sendo os limites das feições urbanas mais visíveis.

Como desvantagem pode ser apontado o fato da vegetação ter aparência muito escura, sem níveis discretos conforme a densidade da vegetação, normalmente visível.

Aqui também surgiram os problemas relacionados com a defasagem temporal da obtenção das imagens, de maneira semelhante ao teste discutido anteriormente.



Fig. 5.2 - Aeroporto de Cumbica , imagem HRV-SPOT, canais S_n e P obtida por transformações IHS.

O tempo de processamento foi maior que no método anterior, ficando em torno de duas horas.

Os resultados em fotografia também foram mosaicados, tendo as mesmas características geométricas que no método anterior.

5.3 - RESULTADOS DO MÉTODO DO OPERADOR MATRICIAL

Descrever o problema através de equações matemáticas e solucioná-lo matematicamente, apresentou-se como sendo o melhor caminho para a obtenção de resultados mais precisos.

A idéia de construir uma matriz que pudesse ser utilizada , independentemente de região ou tema, para integrar-se os canais P e S_n do satélite SPOT mostrou-se adequada.

As operações de multiplicação e inversão de matrizes foram realizadas com o auxílio de um conjunto de programas , orientado para este fim, denominado MATLAB.

A matriz Z, que opera o vetor de dados de entrada, tem uma grande dependência do valor dos fatores da matriz M . Aproximando-se os valores dos sete primeiros elementos aos valores dos doze seguintes, na matriz M, a solução para o sistema aproxima-se de uma matriz pseudo inversa, obtida sem ponderação das equações, diretamente por programas de computador (Apêndice C).

Seguindo-se os valores de cada linha da matriz Z e acompanhando-se o esquema do algoritmo apresentado na Fig. 4.8 percebe-se a coerência dos resultados.

Foram realizados com este método três testes: dois com diferentes valores de ν e outro com uma matriz pseudo inversa não modificada por ν .

Esta matriz foi obtida com a utilização de um programa contido no MATLAB que produz a pseudo inversa "Moore-Penrose".

Podemos ver no Apêndice D, onde são apresentadas as tabelas, que há grande correlação entre os valores das matrizes pseudo inversas, obtidas com o uso de uma matriz diagonal; o valor dos elementos da diagonal e os resultados da pseudo inversa Moore-Penrose.

Cada um desses arranjos foi utilizado como operador no algoritmo de geração de canais, sendo os resultados descritos no próximo tópico.

5.3.1 - CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO OBTIDO

Conforme variou-se o valor de ν , atribuiu-se diferentes pesos às equações obtidas com dados teóricos de desempenho do sensor e dados obtidos com filtragens adaptativas.

O primeiro teste foi realizado com $\nu = 0,5$ e portanto os elementos m e n , da diagonal de "M", valendo respectivamente; 0,071 e 0,0412.

O segundo teste foi realizado com $\nu = 0,7$; sendo $m = 0,100$ e $n = 0,025$.

O terceiro teste foi realizado com a pseudo-inversa Moore-Penrose solucionando diretamente o sistema descrito pela Equação 4.34.

Os resultados foram satisfatórios. Os canais produzidos são bastante decorrelacionados, possuindo informações bem diversificadas. A definição dos elementos de cena é alta, podendo-se distinguir feições com precisão, como podemos ver na Figura 5.3 da imagem obtida.

As diferenças existentes entre a utilização de $\nu = 0,5$; $\nu = 0,7$; e não utilização de ν , podem ser vistas na Figura 5.4 onde temos a mesma subcena processada com esses parâmetros. Os resultados de melhor qualidade pictórica foram obtidos com $\nu = 0,7$; possivelmente por ter havido aumento da contribuição do canal P. É importante salientar, que além destes efeitos, há na Figura 5.4 diferenças de nitidez na parte central, devido também a características do processo fotográfico.

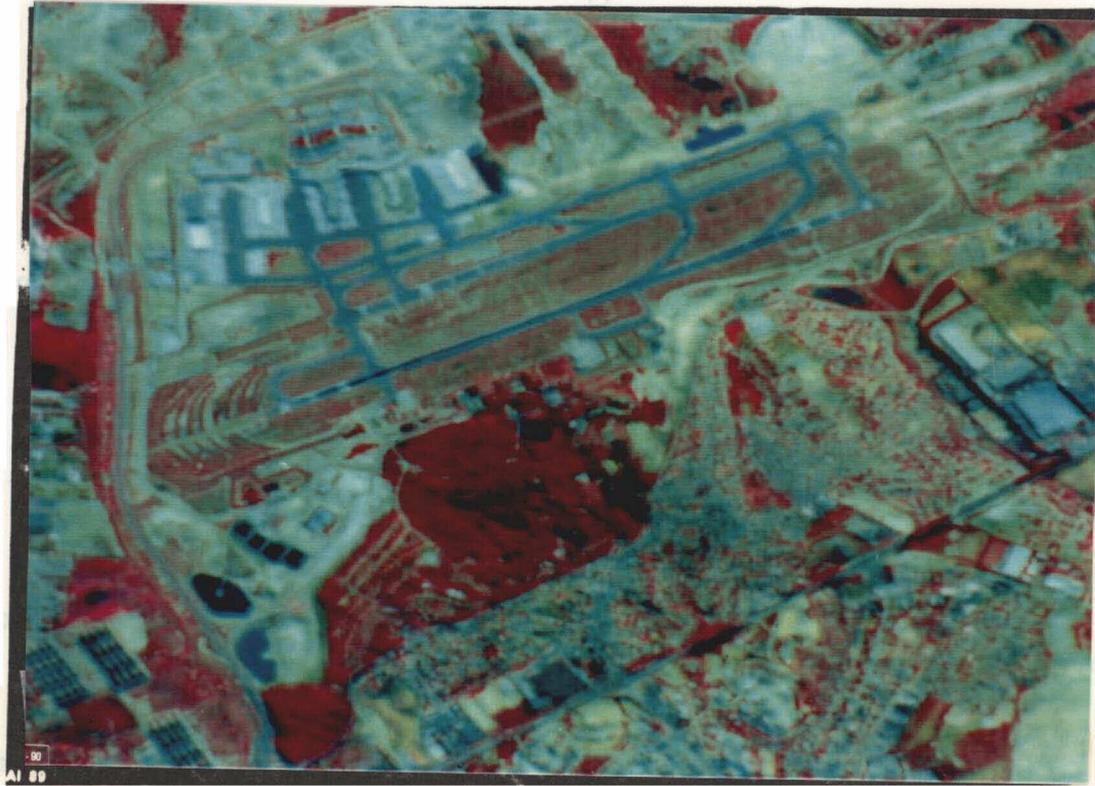


Fig. 5.3 - Imagem SPOT canais P_1 , S_1 , S_2 , S_3 , obtida por operador matricial.

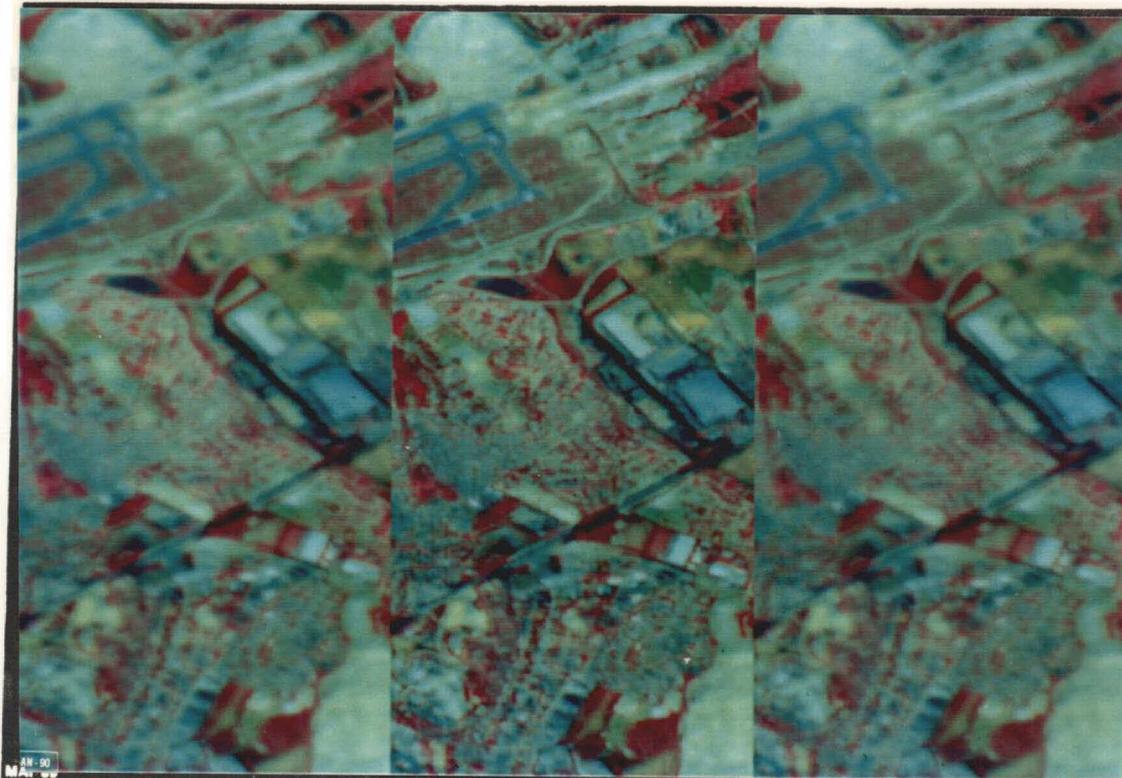


Fig. 5.4 - Subcenas SPOT, canais P , S_1 , S_2 , e S_3 obtidas por operadores matriciais: $\nu = 0,5$; $\nu = 0,7$; matriz 'M' = I.

Na figura 5.5 temos as subcenas produzidas pelos métodos de 'CLICHE', IHS e o método desenvolvido neste trabalho com $v = 0,7$. A qualidade geométrica dos métodos IHS e operador matricial é semelhante tendo porém, o operador matricial apresentado maior resolução espectral (maior diversidade de cores), mais informações sobre a qualidade dos alvos.

Analisando-se cada canal separadamente, podemos observar certa diferença de resolução espacial entre o canal E_3 e os demais (Figs 5.6; 5.7 e 5.8). Isto deve-se ao fato de haver pouca contribuição da definição do canal P na geração desses dados (do canal E_3). Esta característica não interfere na resolução da composição colorida.

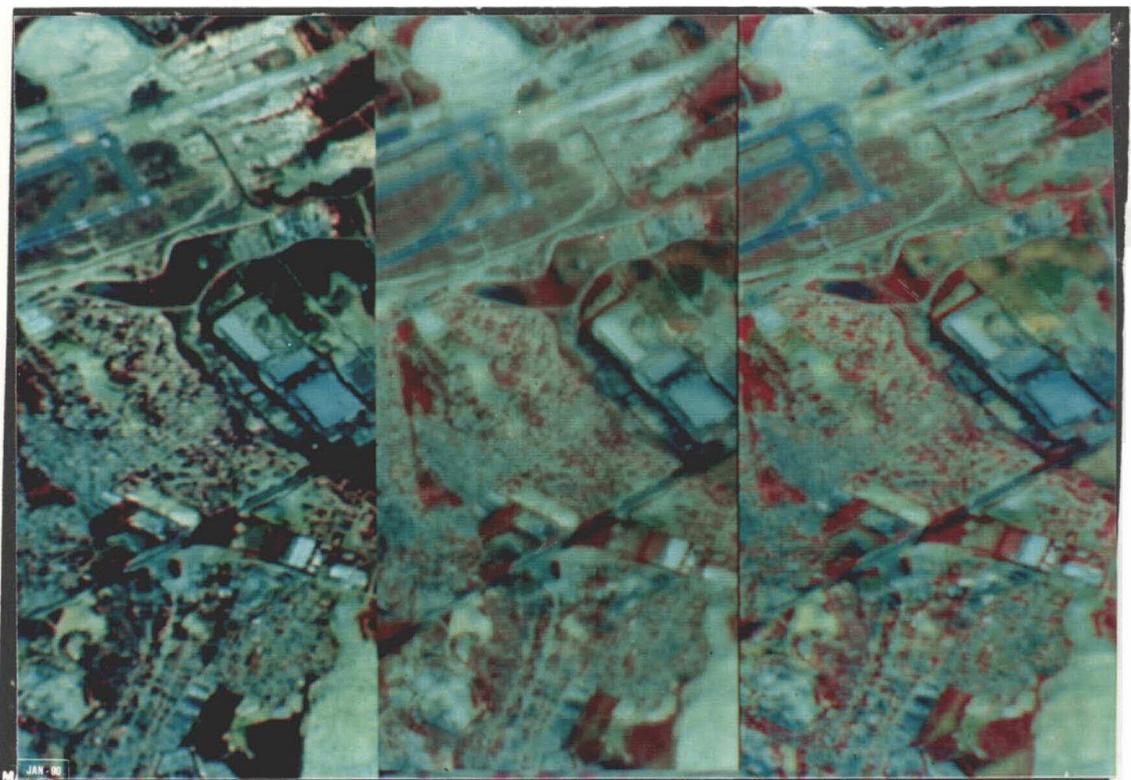


Fig. 5.5 - Subcenas SPOT, canais P, S_1 , S_2 e S_3 obtidas por fusão respectivamente: IHS, CLICHE, operador matricial.

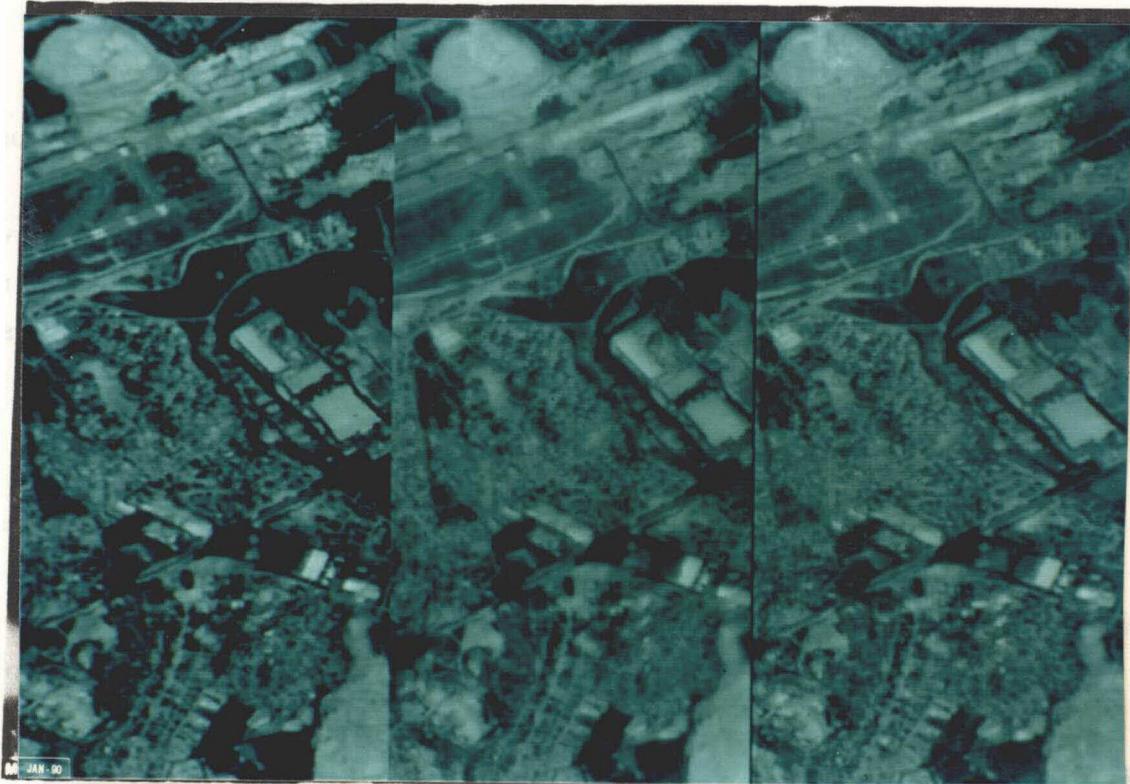


Fig. 5.6 - Canal E_1 resultante dos métodos; IHS, CLICHE e operador matricial.

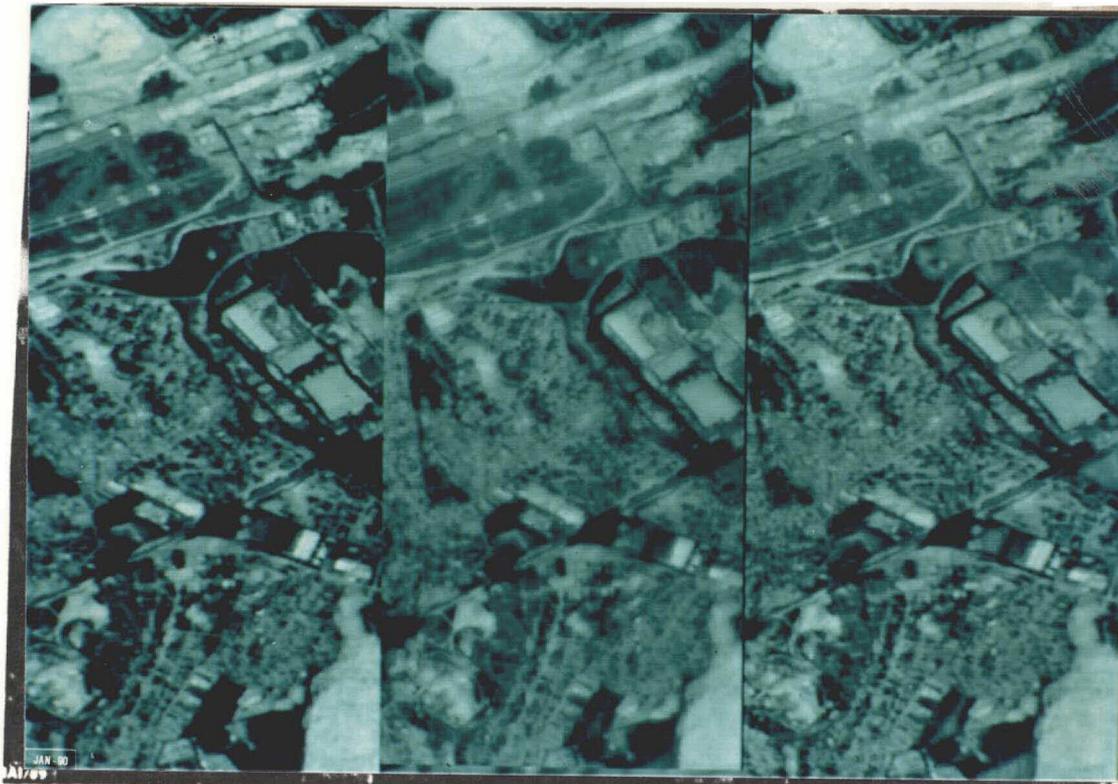


Fig. 5.7 - Canal E_2 resultante dos métodos: IHS, CLICHE, e operador matricial.

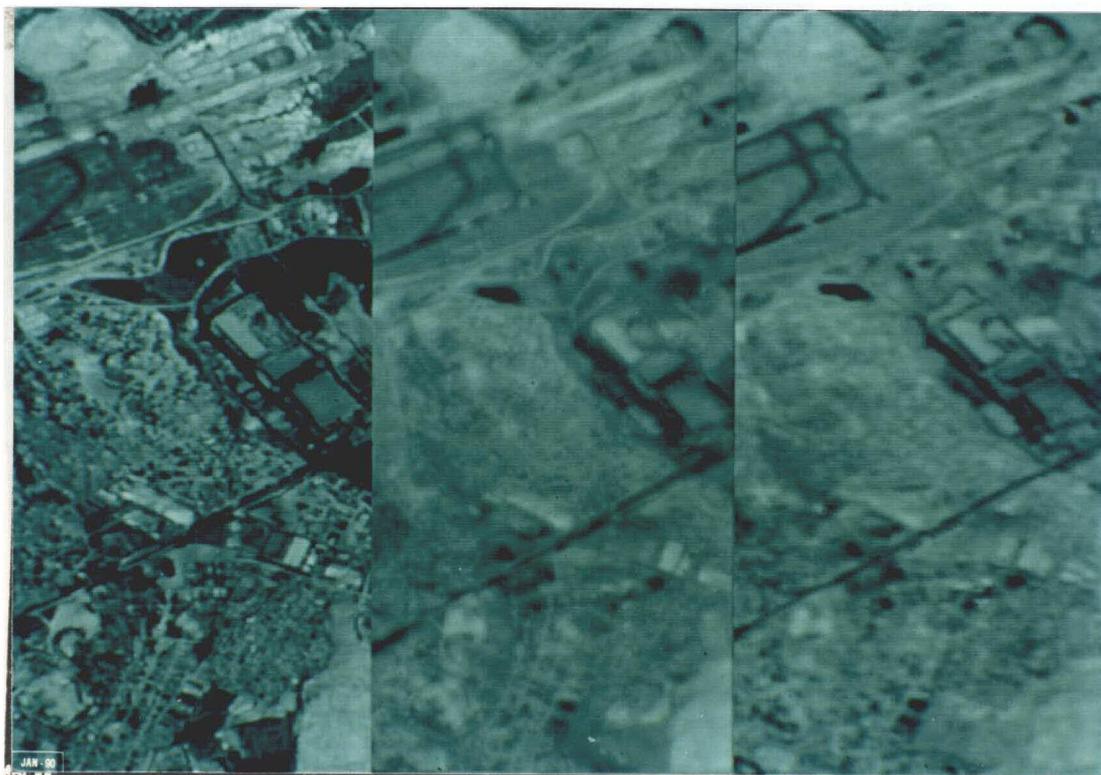
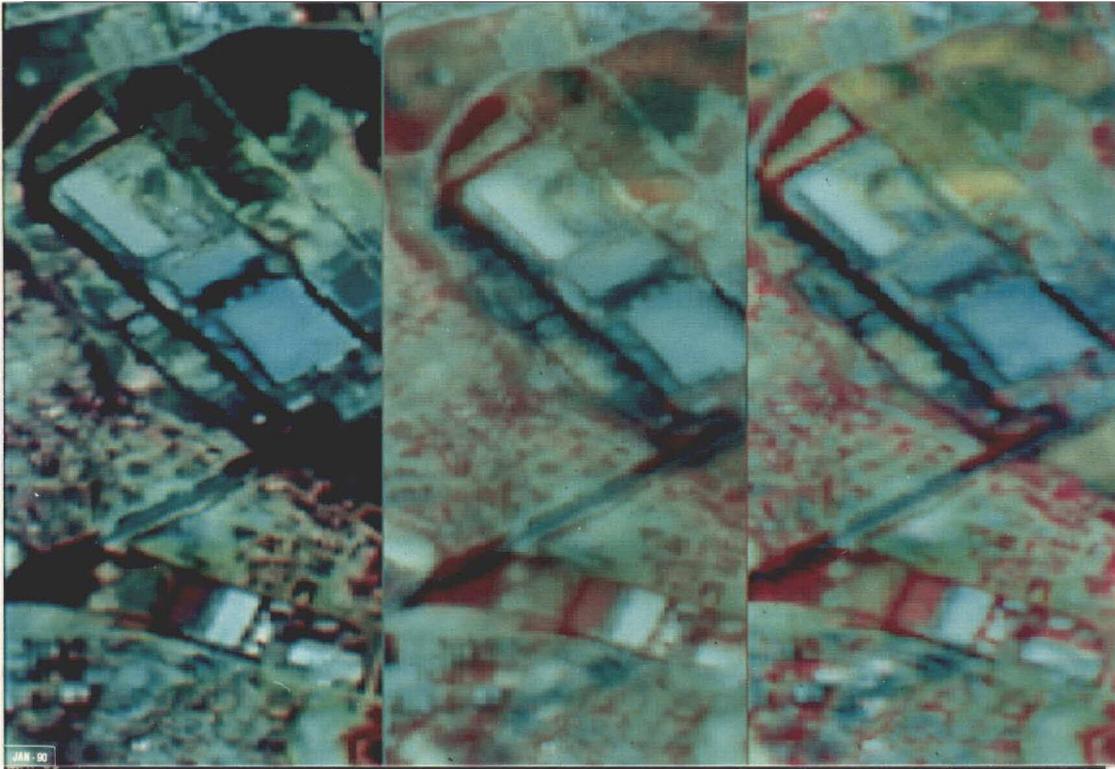


Fig. 5.8 - Canal E_3 resultante dos métodos: IHS, CLICHE e operador matricial.

A solução encontrada neste trabalho, para obtenção de pseudo inversa de matrizes tem resultados numéricos iguais aos resultados da pseudo inversa de Moore Penrose. Verifica-se que os valores de cada linha da matriz Z tornam-se mais próximos dos valores de cada linha da pseudo inversa de Moore Penrose a medida que 'm' e 'n' se aproximam

O somatório dos valores de cada linha das matrizes resultantes obtidas é um (1). Como resultado deste fato, a média dos valores do vetor resultante (elementos da imagem obtida) é igual à média dos valores do vetor de entrada (canais P e S_n , HRV-SPOT e canais S_n reamostrados).



- Fig. 5.9 - Detalhe ampliado da Figura 5.5.

De posse desses resultados e da experiência adquirida no processo de sua obtenção podem ser extraídas sugestões de emprego do método como veremos a seguir.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As imagens resultantes da fusão dos canais S_n e P, utilizando-se o método operador matricial, têm grande volume de informações relativas às propriedades da cena.

As características espectrais e alta resolução espacial das imagens geradas, demonstram a aplicabilidade do método.

Os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho, permitiram concluir que:

- a) A utilização do método Operador Matricial mostrou-se eficiente para a realização de fusão de imagens com diferentes resoluções.
- b) Os parâmetros extraídos a partir das características das curvas de responsividade espectral, foram estimadores adequados para geração do modelo matemático determinante da transformação cena-imagem.
- c) A utilização de matriz diagonal para ponderar pesos das equações de um sistema produz bons resultados.
- d) O registro entre cenas pode apresentar-se como dificuldade ao processo de fusão de dados, quando se trabalha com grandes áreas (mais de 4 módulos de tela) e com grandes diferenças geométricas entre as imagens. Para dados SPOT, com os canais multiespectrais e pancromático adquiridos simultaneamente este problema não ocorre.

- e) Considerando-se as peculiaridades dos sistemas imageadores e seus produtos, o método pode ser implementado para integração entre outros dados, tais como: imagens aéreas digitalizadas, imagens TM-LANDSAT e HRV-SPOT, ou ainda imagens de outros satélites.

As perspectivas de utilização do método empregado permitem a apresentação de algumas sugestões:

- a) O método pode ser aplicado para simular canais, na fase de elaboração de projeto de sensores remotos. Neste caso, os parâmetros que simulariam o modelamento matemático, deverão ser extraídos de resultados, com base em teste de laboratório com o sensor; bem como das características do conjunto de imagens utilizado como dado de entrada.
- b) Os princípios seguidos na confecção do algoritmo utilizado, poderiam ser empregados num sistema de transmissão ou compactação de dados. Isto se daria com a utilização de imagens que tivessem suas informações espaciais e temáticas em diferentes canais ou arquivos. Na reformatação desses dados seriam montados arquivos com características espectrais e espaciais convenientes.
- c) Confeccção de algoritmo para executar automaticamente a fusão entre os canais S_n e P do sensor HRV-SPOT, podendo-se, até mesmo, gerar sistematicamente produtos especiais com características diferentes.

O método certamente tem outras possibilidades em processamento digital de imagens. Cabe analisá-lo no enfoque de cada problema particular e adaptá-lo. Assim são todas as pequenas coisas, pequenos números e pequenos homens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of Remote Sensing*. Falls Church, VA, 1983.
- BANON, G.J.F.; *Estimação de variáveis aleatórias - aplicação à predição linear*. Brasília, DF, IBM, 1983. (Relatório Técnico - OCB012).
- BEGNI, G.; BOISSIN, B.; PERBOS, J. *La qualite des images issues du systeme SPOT et son controle apres le lancement du satellite*. Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, 1985.
- BEN-ISRAEL, A.; Greville, T.N.E. *Generalized inverses: theory and application*. Huntington, NY, Robert E. Krieger, 1980.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, I.O. *Applied numerical methods*. New York, John Wiley & Sons, 1969.
- CHAVEZ, P.S. Jr. Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24,000 - scale image mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(10):1637-1646, 1986.
- CLICHE, G.; BONN, F.; TEILLET, P. Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(3):311-316, 1985.
- CORLAY, G.; HENRY, C.; PAUL, J.B. HRV SPOT camera detection unit: optical and radiometric characteristics. In: EIGHTEENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, Paris, France, oct 1-5, 1984, p. 941-955.

DAILY, M.I.; FARR, T.; ELACHI, C. Geologic interpretation from composited radar and landsat imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45(8):1109-1116, 1979.

DUTRA, L.V.; MENEZES, P.R. Aplicação da transformação IHS para realce de cores em imagens Landsat. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, VI REUNION PLENARIA SELPER, Gramado, RS, 1986. *Anais*, Gramado, 1986. v. 1, p. 675-681.

GERALD, C.F.; WHEATLEY, P.O. *Applied numerical analysis*. 3. ed. Reading, MA, Addison-Wesley, 1981.

MULDER, N.J. Feature specific spatial and spectral sensors artificial retinas in space. Enschede, Netherlands, International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences I.T.C., 1979.

MATHWORKS. Version 3.0 - PC *MATLAB User's Guide*; Sherborn, MA, Feb. 1987.

PRATT, W.K. *Digital image processing*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 750 p.

RAO, C.R.; MITRA, S.K. *Generalized inverse of matrices and its applications*. New York, John Wiley & Sons, 1971.

ROSENFELD, A.; KAK, A.C. *Digital picture processing*. 2. ed. Orlando, FL, Academic Press, 1982. v. 1. 435 p.

SLATER, P.N. *Remote Sensing: optics and optical systems*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980.

APENDICE A

ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO DOS CANAIS REAMOSTRADOS

/* ALGORITMO MESCLA */

/* ABERTURA DE IMAGENS */

```
abre_imagem(&imagem1);
abre_imagem(&imagem2);
abre_imagem(&imagem3);
abre_imagem(&imagem4);
abre_imagem(&imagem5);
```

/* PROCESSANDO MESCLA */

```
lin  <— 0;
linha <— 0;
```

Se <> fim_imagens faça

```
{
le_linha(&imagem1, linha, buf1, tam_linha);
le_linha(&imagem2, linha, buf2, tam_linha);
le_linha(&imagem3, linha, buf3, tam_linha);
le_linha(&imagem4, linha, buf4, tam_linha);
col_lida <— 0;
col_res  <— 0;
```

Se <> fim_linha faça

```
{
buf5[col_res] <— buf1[col_lida];
buf5[col_res+1] <— buf2[col_lida];
col_lida      <— col_lida + 1;
col_res       <— col_res  + 2;
}
```

```
escreve_linha(&imagem5, lin, buf5, tam_linha);
col_lida <— 0;
col_res  <— 0;
```

Se <> fim_linha faça

```
{
buf5[col_res] <— buf3[col_lida];
buf5[col_res+1] <— buf4[col_lida];
col_lida      <— col_lida + 1;
col_res       <— col_res  + 2;
```

```
    }  
    escreve_linha(&imagem5, lin, buf5, tam_linha);  
    lin    <— lin + 2;  
  
}
```

/* FECHAMENTO DE IMAGENS */

```
fecha_imagem(&imagem1);  
fecha_imagem(&imagem2);  
fecha_imagem(&imagem3);  
fecha_imagem(&imagem4);  
fecha_imagem(&imagem5);
```

/* FIM DO ALGORÍTHO MESCLA */

PRIMITIVAS UTILIZADAS :

- abre_imagem(&imagem) —> abre imagem para processamento
- le_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) —> lê linhas da imagem
- escreve_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) —> escreve linhas da imagem
- fecha_imagem(&imagem) —> fecha imagem depois de processada

APENDICE B

ALGORITMO DE FUSÃO (CLICHE)

/ ALGORITMO FUSÃO (ALG. CLICHE) */

/* ABERTURA DE IMAGENS */

```
abre_imagem(&imagem1);
abre_imagem(&imagem2);
abre_imagem(&imagem3);
abre_imagem(&imagem4);
abre_imagem(&imagem5);
abre_imagem(&imagem6);
abre_imagem(&imagem7);
```

/* PROCESSANDO FUSÃO */

linha ← 0;

Se <> fim_imagens faça

```
{
  le_linha(&imagem1, linha, buf1, tam_linha);
  le_linha(&imagem4, linha, buf2, tam_linha);
  col_lida ← 0;
  col_res ← 0;
```

Se <> fim_linha faça

```
{
  pix ← ( buf1[col_lida] + 1) * (buf2[col_lida] + 1);
  pix1 ← (int) (sqrt(pix) + 0.5) - 1;
  buf3[col_res] ← (char) (pix1);
  col_lida ← col_lida + 1;
  col_res ← col_res + 1;
}
  escreve_linha(&imagem5, linha, buf3, tam_linha);
```

```
le_linha(&imagem2, linha, buf1, tam_linha);
col_lida ← 0;
col_res ← 0;
```

Se <> fim_linha faça

```
{
  pix ← (buf1[col_lida] + 1) * (buf2[col_lida] + 1);
  pix1 ← (int) (sqrt(pix) + 0.5) - 1;
  buf3[col_res] ← (char) (pix1);
  col_lida ← col_lida + 1;
  col_res ← col_res + 1;
}
```

```
    escreve_linha(&imagem6, linha, buf3, tam_linha);

le_linha(&imagem3, linha, buf1, tam_linha);
col_lida <--- 0;
col_res <--- 0;

Se <> fim_linha faça
    {
        pix1 <--- (int)((float)(0.25 * buf2[col_lida]) +
            (float)(0.75 * buf1[col_lida]) + 0.5);
        buf3[col_res] <--- (char) (pix1);
        col_lida <--- col_lida + 1;
        col_res <--- col_res + 1;
    }
    escreve_linha(&imagem7, linha, buf3, tam_linha);
}
```

/* FECHAMENTO DAS IMAGENS */

```
fecha_imagem(&imagem1);
fecha_imagem(&imagem2);
fecha_imagem(&imagem3);
fecha_imagem(&imagem4);
fecha_imagem(&imagem5);
fecha_imagem(&imagem6);
fecha_imagem(&imagem7);
```

/* FIM DO ALGORITMO FUSAO */

PRIMITIVAS UTILIZADAS :

- abre_imagem(&imagem) → abre imagem para processamento
- le_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) → lê linhas da imagem
- escreve_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) → escreve linhas da imagem
- fecha_imagem(&imagem) → fecha imagem depois de processada.

APENDICE C

ALGORITMO NYH - MULTIPLICAÇÃO MATRIZ / VETOR

```
/* ALGORITMO NYH (MULTIPLICAÇÃO MATRIZ / VETOR) */
```

```
/* ABERTURA DE IMAGENS */
```

```
abre_imagem(&imagem1);  
abre_imagem(&imagem2);  
abre_imagem(&imagem3);  
abre_imagem(&imagem4);  
abre_imagem(&imagem5);  
abre_imagem(&imagem6);  
abre_imagem(&imagem7);  
abre_imagem(&imagem8);  
abre_imagem(&imagem9);  
abre_imagem(&imagem10);
```

```
/* LEITURA DA MATRIZ DE OPERAÇÃO (rotina lematriz) */
```

```
lematriz();
```

```
/* PROCESSANDO NYH */
```

```
linha <--- 0;
```

```
Se <> fim_imagens faça
```

```
{  
  le_linha(&imagem1, linha, buf1, tam_linha);  
  le_linha(&imagem1, linha+1, buf1a, tam_linha);  
  le_linha(&imagem2, linha, buf2, tam_linha);  
  le_linha(&imagem3, linha, buf3, tam_linha);  
  le_linha(&imagem4, linha, buf4, tam_linha);  
  le_linha(&imagem5, linha, buf5, tam_linha);  
  le_linha(&imagem5, linha+1, buf5a, tam_linha);  
  le_linha(&imagem6, linha, buf6, tam_linha);  
  le_linha(&imagem6, linha+1, buf6a, tam_linha);  
  le_linha(&imagem7, linha, buf7, tam_linha);  
  le_linha(&imagem7, linha+1, buf7a, tam_linha);
```

```
  col_lida <--- 0;
```

```
  col_res <--- 0;
```

```
  Se <> fim_linha faça
```

```
  {
```

```
/* ATRIBUIÇÃO DE VALORES AO VETOR DE OPERAÇÃO */
```

```
  v[0] <--- (float) buf1[col_lida];
```

```
v[1] <— (float) buf1[col_lida+1];
v[2] <— (float) buf1a[col_lida];
v[3] <— (float) buf1a[col_lida+1];
v[4] <— (float) buf2[col_lida];
v[5] <— (float) buf3[col_lida];
v[6] <— (float) buf4[col_lida];
v[7] <— (float) buf5[col_lida];
v[8] <— (float) buf5[col_lida+1];
v[9] <— (float) buf5a[col_lida];
v[10] <— (float) buf5a[col_lida+1];
v[11] <— (float) buf6[col_lida];
v[12] <— (float) buf6[col_lida+1];
v[13] <— (float) buf6a[col_lida];
v[14] <— (float) buf6a[col_lida+1];
v[15] <— (float) buf7[col_lida];
v[16] <— (float) buf7[col_lida+1];
v[17] <— (float) buf7a[col_lida];
v[18] <— (float) buf7a[col_lida+1];
```

/* REALIZA A OPERAÇÃO MATRIZ * VETOR (rotina mulvm) */

```
mulvm(v, vr);
```

/* GERA IMAGENS ATRAVÉS DO VETOR RESULTANTE (vr) */

```
buf8[col_res] <— (char)vr[0];
buf8[col_res+1] <— (char)vr[1];
buf8a[col_res] <— (char)vr[2];
buf8a[col_res+1] <— (char)vr[3];
buf9[col_res] <— (char)vr[4];
buf9[col_res+1] <— (char)vr[5];
buf9a[col_res] <— (char)vr[6];
buf9a[col_res+1] <— (char)vr[7];
buf10[col_res] <— (char)vr[8];
buf10[col_res+1] <— (char)vr[9];
buf10a[col_res] <— (char)vr[10];
buf10a[col_res+1] <— (char)vr[11];
```

```
col_lida <— col_lida + 2;
```

```
col_res <— col_res + 2;
```

```
}
```

```
le_linha(&imagem2, linha+1, buf2a, tam_linha);
```

```
le_linha(&imagem3, linha+1, buf2a, tam_linha);
```

```
le_linha(&imagem4, linha+1, buf2a, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem8, linha, buf8, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem8, linha+1, buf8a, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem9, linha, buf9, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem9, linha+1, buf9a, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem10, linha, buf10, tam_linha);
```

```
escreve_linha(&imagem10, linha+1, buf10a, tam_linha);
```

```
linha <— linha + 2;
```

}

/* FECHAMENTO DAS IMAGENS */

```
fecha_imagem(&imagem1);  
fecha_imagem(&imagem2);  
fecha_imagem(&imagem3);  
fecha_imagem(&imagem4);  
fecha_imagem(&imagem5);  
fecha_imagem(&imagem6);  
fecha_imagem(&imagem7);  
fecha_imagem(&imagem8);  
fecha_imagem(&imagem9);  
fecha_imagem(&imagem10);
```

/* FIM DO ALGORÍTHMO MVM */

PRIMITIVAS UTILIZADAS :

- abre_imagem(&imagem) → abre imagem para processamento
- le_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) → lê linhas da imagem
- escreve_linha(&imagem, linha, buf, tam_linha) → escreve linhas da imagem
- fecha_imagem(&imagem) → fecha imagem depois de processada.

ROTINAS UTILIZADAS :

- lematriz → lê a matriz de operação
- mulvm → realiza a operação de multiplicação matriz / vetor

APENDICE D

MATRIZES USADAS NA SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

MATRIZ 'Y' - Dados extraídos das curvas de responsividade espectral

Columns 1 through 7

0.4328	0	0	0	0.5597	0	0
0	0.4328	0	0	0	0.5597	0
0	0	0.4328	0	0	0	0.5597
0	0	0	0.4328	0	0	0
0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.0004	0.0004	0.0004
0	0	0	0	0.2481	0.2481	0.2481
0	0	0	0	0	0	0
1.0000	0	0	0	0	0	0
0	1.0000	0	0	0	0	0
0	0	1.0000	0	0	0	0
0	0	0	1.0000	0	0	0
0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	0	0	1.0000
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 12

0	0.0174	0	0	0
0	0	0.0174	0	0
0	0	0	0.0174	0
0.5597	0	0	0	0.0174
0.0004	0	0	0	0
0.2481	0	0	0	0
0	0.2489	0.2489	0.2489	0.2489
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1.0000	0	0	0	0
0	1.0000	0	0	0
0	0	1.0000	0	0
0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	1.0000

MATRIZ 'Z' - $\nu = 0,5$

Columns 1 through 7

0.3806	-0.0186	-0.0186	-0.0186	0.2571	-0.0545	-0.0017
-0.0186	0.3806	-0.0186	-0.0186	0.2571	-0.0545	-0.0017
-0.0186	-0.0186	0.3806	-0.0186	0.2571	-0.0545	-0.0017
-0.0186	-0.0186	-0.0186	0.3806	0.2571	-0.0545	-0.0017
0.4923	-0.0239	-0.0239	-0.0239	-0.0542	0.2287	-0.0022
-0.0239	0.4923	-0.0239	-0.0239	-0.0542	0.2287	-0.0022
-0.0239	-0.0239	0.4923	-0.0239	-0.0542	0.2287	-0.0022
-0.0239	-0.0239	-0.0239	0.4923	-0.0542	0.2287	-0.0022
0.0153	-0.0007	-0.0007	-0.0007	-0.0017	-0.0022	0.2994
-0.0007	0.0153	-0.0007	-0.0007	-0.0017	-0.0022	0.2994
-0.0007	-0.0007	0.0153	-0.0007	-0.0017	-0.0022	0.2994
-0.0007	-0.0007	-0.0007	0.0153	-0.0017	-0.0022	0.2994

Columns 8 through 14

0.7714	-0.0558	-0.0558	-0.0558	-0.1996	0.0238	0.0238
-0.0558	0.7714	-0.0558	-0.0558	0.0238	-0.1996	0.0238
-0.0558	-0.0558	0.7714	-0.0558	0.0238	0.0238	-0.1996
-0.0558	-0.0558	-0.0558	0.7714	0.0238	0.0238	0.0238
-0.1996	0.0238	0.0238	0.0238	0.6677	-0.0433	-0.0433
0.0238	-0.1996	0.0238	0.0238	-0.0433	0.6677	-0.0433
0.0238	0.0238	-0.1996	0.0238	-0.0433	-0.0433	0.6677
0.0238	0.0238	0.0238	-0.1996	-0.0433	-0.0433	-0.0433
-0.0062	0.0007	0.0007	0.0007	-0.0080	0.0010	0.0010
0.0007	-0.0062	0.0007	0.0007	0.0010	-0.0080	0.0010
0.0007	0.0007	-0.0062	0.0007	0.0010	0.0010	-0.0080
0.0007	0.0007	0.0007	-0.0062	0.0010	0.0010	0.0010

Columns 15 through 19

0.0238	-0.0062	0.0007	0.0007	0.0007
0.0238	0.0007	-0.0062	0.0007	0.0007
0.0238	0.0007	0.0007	-0.0062	0.0007
-0.1996	0.0007	0.0007	0.0007	-0.0062
-0.0433	-0.0080	0.0010	0.0010	0.0010
-0.0433	0.0010	-0.0080	0.0010	0.0010
-0.0433	0.0010	0.0010	-0.0080	0.0010
0.6677	0.0010	0.0010	0.0010	-0.0080
0.0010	0.9252	-0.0745	-0.0745	-0.0745
0.0010	-0.0745	0.9252	-0.0745	-0.0745
0.0010	-0.0745	-0.0745	0.9252	-0.0745
-0.0080	-0.0745	-0.0745	-0.0745	0.9252

MATRIZ 'Z' - $\nu = 0,7$

Columns 1 through 7

0.5406	-0.0358	-0.0358	-0.0358	0.4061	-0.1216	-0.0038
-0.0358	0.5406	-0.0358	-0.0358	0.4061	-0.1216	-0.0038
-0.0358	-0.0358	0.5406	-0.0358	0.4061	-0.1216	-0.0038
-0.0358	-0.0358	-0.0358	0.5406	0.4061	-0.1216	-0.0038
0.6994	-0.0460	-0.0460	-0.0460	-0.1212	0.3430	-0.0049
-0.0460	0.6994	-0.0460	-0.0460	-0.1212	0.3430	-0.0049
-0.0460	-0.0460	0.6994	-0.0460	-0.1212	0.3430	-0.0049
-0.0460	-0.0460	-0.0460	0.6994	-0.1212	0.3430	-0.0049
0.0217	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0038	-0.0049	0.4998
-0.0014	0.0217	-0.0014	-0.0014	-0.0038	-0.0049	0.4998
-0.0014	-0.0014	0.0217	-0.0014	-0.0038	-0.0049	0.4998
-0.0014	-0.0014	-0.0014	0.0217	-0.0038	-0.0049	0.4998

Columns 8 through 14

0.6651	-0.0854	-0.0854	-0.0854	-0.2726	0.0500	0.0500
-0.0854	0.6651	-0.0854	-0.0854	0.0500	-0.2726	0.0500
-0.0854	-0.0854	0.6651	-0.0854	0.0500	0.0500	-0.2726
-0.0854	-0.0854	-0.0854	0.6651	0.0500	0.0500	0.0500
-0.2726	0.0500	0.0500	0.0500	0.5235	-0.0593	-0.0593
0.0500	-0.2726	0.0500	0.0500	-0.0593	0.5235	-0.0593
0.0500	0.0500	-0.2726	0.0500	-0.0593	-0.0593	0.5235
0.0500	0.0500	0.0500	-0.2726	-0.0593	-0.0593	-0.0593
-0.0085	0.0016	0.0016	0.0016	-0.0110	0.0020	0.0020
0.0016	-0.0085	0.0016	0.0016	0.0020	-0.0110	0.0020
0.0016	0.0016	-0.0085	0.0016	0.0020	0.0020	-0.0110
0.0016	0.0016	0.0016	-0.0085	0.0020	0.0020	0.0020

Columns 15 through 19

0.0500	-0.0085	0.0016	0.0016	0.0016
0.0500	0.0016	-0.0085	0.0016	0.0016
0.0500	0.0016	0.0016	-0.0085	0.0016
-0.2726	0.0016	0.0016	0.0016	-0.0085
-0.0593	-0.0110	0.0020	0.0020	0.0020
-0.0593	0.0020	-0.0110	0.0020	0.0020
-0.0593	0.0020	0.0020	-0.0110	0.0020
0.5235	0.0020	0.0020	0.0020	-0.0110
0.0020	0.8752	-0.1244	-0.1244	-0.1244
0.0020	-0.1244	0.8752	-0.1244	-0.1244
0.0020	-0.1244	-0.1244	0.8752	-0.1244
-0.0110	-0.1244	-0.1244	-0.1244	0.8752

MATRIZ PSEUDO INVERSA "MOORE PENROSE"

Columns 1 through 7

0.2782	-0.0102	-0.0102	-0.0102	0.1778	-0.0276	-0.0009
-0.0102	0.2782	-0.0102	-0.0102	0.1778	-0.0276	-0.0009
-0.0102	-0.0102	0.2782	-0.0102	0.1778	-0.0276	-0.0009
-0.0102	-0.0102	-0.0102	0.2782	0.1778	-0.0276	-0.0009
0.3598	-0.0131	-0.0131	-0.0131	-0.0274	0.1634	-0.0011
-0.0131	0.3598	-0.0131	-0.0131	-0.0274	0.1634	-0.0011
-0.0131	-0.0131	0.3598	-0.0131	-0.0274	0.1634	-0.0011
-0.0131	-0.0131	-0.0131	0.3598	-0.0274	0.1634	-0.0011
0.0112	-0.0004	-0.0004	-0.0004	-0.0009	-0.0011	0.1994
-0.0004	0.0112	-0.0004	-0.0004	-0.0009	-0.0011	0.1994
-0.0004	-0.0004	0.0112	-0.0004	-0.0009	-0.0011	0.1994
-0.0004	-0.0004	-0.0004	0.0112	-0.0009	-0.0011	0.1994

Columns 8 through 14

0.8354	-0.0398	-0.0398	-0.0398	-0.1489	0.0125	0.0125
-0.0398	0.8354	-0.0398	-0.0398	0.0125	-0.1489	0.0125
-0.0398	-0.0398	0.8354	-0.0398	0.0125	0.0125	-0.1489
-0.0398	-0.0398	-0.0398	0.8354	0.0125	0.0125	0.0125
-0.1489	0.0125	0.0125	0.0125	0.7581	-0.0332	-0.0332
0.0125	-0.1489	0.0125	0.0125	-0.0332	0.7581	-0.0332
0.0125	0.0125	-0.1489	0.0125	-0.0332	-0.0332	0.7581
0.0125	0.0125	0.0125	-0.1489	-0.0332	-0.0332	-0.0332
-0.0046	0.0004	0.0004	0.0004	-0.0060	0.0005	0.0005
0.0004	-0.0046	0.0004	0.0004	0.0005	-0.0060	0.0005
0.0004	0.0004	-0.0046	0.0004	0.0005	0.0005	-0.0060
0.0004	0.0004	0.0004	-0.0046	0.0005	0.0005	0.0005

Columns 15 through 19

0.0125	-0.0046	0.0004	0.0004	0.0004
0.0125	0.0004	-0.0046	0.0004	0.0004
0.0125	0.0004	0.0004	-0.0046	0.0004
-0.1489	0.0004	0.0004	0.0004	-0.0046
-0.0332	-0.0060	0.0005	0.0005	0.0005
-0.0332	0.0005	-0.0060	0.0005	0.0005
-0.0332	0.0005	0.0005	-0.0060	0.0005
0.7581	0.0005	0.0005	0.0005	-0.0060
0.0005	0.9502	-0.0496	-0.0496	-0.0496
0.0005	-0.0496	0.9502	-0.0496	-0.0496
0.0005	-0.0496	-0.0496	0.9502	-0.0496
-0.0060	-0.0496	-0.0496	-0.0496	0.9502