



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-10462-TDI/929

RESTAURAÇÃO DE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT-7

Giovanni de Araujo Boggione

Dissertação de Mestrado do Curso da Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Leila Maria Garcia Fonseca e Luciano Vieira Dutra, aprovada em
17 de junho de 2003.

528.711.7

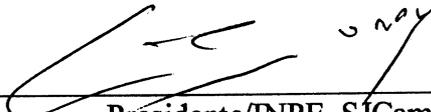
BOGGIONE, G. A.

Restauração de imagens do satélite LANDSAT-7 /
G. A. Boggione. – São José dos Campos: INPE, 2003.
160p. – (INPE-10462-TDI/929).

1.Restauração. 2.Landsat-7. 3.Processamento de
imagens. 4.Função de Transferência de Modulação (FTM).
5.Effective Instantaneous Field of View (EIFOV). 6.Inter-
polação. I.Título

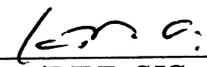
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto.

Dr. Gerald Jean Francis Banon



Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr^a Leila Maria Garcia Fonseca



Orientadora/INPE, SJCampos-SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



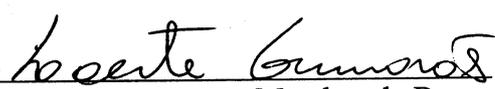
Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr^a Evlyn Márcia de Moraes Novo



Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. Laerte Guimarães Ferreira Júnior



Membro da Banca
Convidado Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO

Candidato: Giovanni de Araujo Boggione

São José dos Campos, 17 de junho de 2003.

“O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto”.

THOMAS HUXLEY

*A meus pais,
Basílio José Lazzarotti Boggione e
Amália de Araújo Boggione.
A meu avô,
José Boggione.
A minha noiva,
Veruska.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Dra. Leila Maria Garcia Fonseca, pelo conhecimento passado, pela orientação dispensada e pela valiosa ajuda na melhoria da redação desta dissertação e na execução deste trabalho.

Ao Dr. Luciano Vieira Dutra, pela orientação na realização deste trabalho.

Ao Dr. Storey pela solicitude e boa vontade em disponibilizar os dados utilizados nesta dissertação.

Aos Membros da Banca Examinadora, pelas críticas e sugestões apresentadas.

À CAPES pelo suporte financeiro durante as pesquisas e execução do trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos professores do INPE pelo conhecimento compartilhado.

Aos professores do CEFET-GO pelo apoio e estímulo.

Aos professores Nilton Ricetti Nazareno e João Cortes pelo intenso apoio, torcida e companheirismo.

Aos Drs. Díbio Leandro Borges e Rodrigo Pinto Lemos, Tenente Luciano do SIVAM e professor João Luiz pelas longas horas de discussão que tivemos e pela boa vontade em ajudar.

Aos colegas do INPE, em especial, Alda, Fernando, Dimitri, Kamel e Rodrigo pelo grande apoio e idéias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Marcelinho e a Flávia pela amizade e apoio durante o trabalho.

Aos meus alunos do CEFET-GO que me permitem a cada dia me renovar como pessoa.

A meus pais por sempre acreditarem na importância do estudo e às minhas irmãs pela paciência e estímulo.

Enfim, a todos que fizeram e fazem parte, desta importante etapa da minha vida.

VALEU!!!!!!

RESUMO

As técnicas de restauração de imagens são orientadas para a modelagem da degradação e recuperação do sinal original que foi degradado durante o processo de formação de imagens. Em Sensoriamento Remoto, a resolução espacial nominal do sensor, que define a precisão com que os detalhes dos objetos de interesse na imagem são perceptíveis, é uma das características mais importantes. Durante o processo de geração de imagens, a resolução espacial é degradada devido à difração óptica, ao tamanho do detector, às limitações do filtro eletrônico, canal de transmissão, etc. Esta degradação faz com que as imagens apresentem um aspecto borrado, que caracteriza a perda de detalhes. Uma forma de avaliar o desempenho do sensor, em termos de resolução espacial, é através de um parâmetro chamado Effective Instantaneous Field of View (EIFOV), que define a resolução espacial efetiva do sensor. Nos sistemas a bordo de satélites, os valores de EIFOV são piores do que a resolução nominal, a qual não leva em conta as imperfeições do sensor. Por técnicas de restauração, é possível melhorar a resolução efetiva da imagem até um certo nível. Assim, a proposta deste trabalho é realizar uma avaliação da resolução efetiva das bandas do sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+) do Landsat-7, e implementar um método de restauração para corrigir as imagens geradas por este sensor. O modelo do sistema de imageamento do sensor ETM+, bem como os fatores que contribuem para a degradação de sua resolução espacial efetiva são, aqui, discutidos. O algoritmo de restauração é baseado no método da compensação da função de transferência do sensor ou método do filtro inverso modificado. Além disso, a combinação dos processos de restauração e reamostragem é usada para gerar imagens ETM+ em uma grade de amostragem mais fina com qualidade visual melhor que as imagens reamostradas através de interpoladores convencionais tais com o de convolução cúbica.

RESTORATION OF LANDSAT-7 SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

The techniques of image restoration are oriented for the modeling of the degradation and recovery of the original signal that was degraded during the process of image formation. In Remote Sensing, sensor's nominal spatial resolution, that defines the precision with which details of objects of interest in the image are perceivable, is one of the most important characteristics. During the process of image generation, the spatial resolution is degraded due to optic diffraction, to detector size, to limitations of the electronic filter, to means of transmission, etc. This degradation makes that the images present a blurred aspect that characterizes the loss of details. A form to evaluate the performance of the sensor, in terms of spatial resolution, is through Effective Instantaneous Field of View parameter (EIFOV) that defines the effective spatial resolution of the sensor. In the on board satellite systems, the values of EIFOV are usually worst then the nominal resolution, which does not take in account the imperfections of the sensor. Using restoration techniques, it is possible to improve the effective resolution of the image up to a certain level. Thus, this work's proposal is to accomplish an evaluation of the effective resolution of Enhanced Thematic Mapper (ETM+) bands of Landsat-7 satellite, and to implement a restoration method to correct the images generated by this sensor. The model of imaging system of ETM+ sensor, as well as, the factors that contribute for the degradation of its effective spatial resolution are discussed in this work. The restoration algorithm is based on the method of the compensation of transference function of the sensor or on the method of the modified inverse filter. Moreover, the combination of processes of restoration and resampling are used to generate ETM+ images in a finer grid with better visual quality then the images resampled through conventional interpolation filters such as the one of cubic convolution.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Proposta do Trabalho	26
1.2 Organização da Dissertação	27
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
2.1 Processo de Formação de Imagens	29
2.1.1 Caracterização de Imagens	32
2.1.2 Caracterização Matemática.....	34
2.2 Transformada de Fourier	36
2.3 Análise em Frequência.....	37
CAPÍTULO 3 RESTAURAÇÃO DE IMAGENS	41
3.1 Problema de Restauração Sob Aspecto Matemático.....	43
3.2 Filtro Inverso Modificado	47
CAPÍTULO 4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SENSOR ETM+	51
4.1 Sensor ETM+ do Landsat-7	51
4.2 Descrição e Degradações dos Principais Subistemas do Sensor	58
4.3 Modelo dos Sistemas Imageadores	64
4.4 Função de Transferência do Sensor ETM+	68
4.4.1 Aproximação da Função de Transferência por um Modelo Gaussiano	68
4.4.2 Estimação da Função de Transferência por um Modelo Teórico Apoiado em Dados Levantados Experimentalmente	74

CAPÍTULO 5 ANÁLISE DOS PROCESSOS DE RESTAURAÇÃO E INTERPOLAÇÃO DE IMAGENS	87
5.1 Interpolação.....	87
5.2 Processo Combinado Para Interpolação e Restauração.....	88
5.3 Projeto do Filtro Inverso Modificado.....	94
5.4 Implementação do Filtro de Restauração	104
CAPÍTULO 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	111
6.1 Avaliação das Imagens Restauradas.....	113
6.2 Área de Estudo I: Rio de Janeiro/RJ	114
6.3 Área de Estudo II: Brasília/DF.....	128
6.4 Área de Estudo III: Vale do Paraíba/SP	141
6.5 Análise dos Resultados	152
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO	155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Esquema dos estágios de processamento de imagens.	25
2.1 - Esquema da captação da REM pelo sensor.	30
2.2 - Esquema do processo de formação de imagem.	31
2.3 - Representação do objeto em termos de uma matriz numérica.	31
2.4 - Definição de IFOV.	33
2.5 - Definição de EIFOV; d é a dimensão do detector.	34
2.6 - Uma função simples e seu espectro de Fourier.	37
3.1 - Modelo do processo de formação de imagens.	43
3.2 - Sistema amostrado e o filtro de restauração.	45
3.3 - Representação equivalente do sistema amostrado seguido pelo filtro de restauração.	46
3.4 - Modificação da resposta do sistema pelo processo de restauração.	47
4.1 - Ilustração do satélite Landsat-7.	52
4.2 - Litoral do Estado de São Paulo.	54
4.3 - Exemplo de imagem Pancromática do Landsat-7. Cidade do Rio de Janeiro.	55
4.4 - Componentes do Sensor ETM+.	56
4.5 - Diagrama de blocos do sistema imageador eletromecânico.	59
4.6 - O efeito de aliasing.	61
4.7 - Ilustração gráfica do conceito de amostragem.	63
4.8 - Subsistema imageador ETM+.	66
4.9 - Metodologia para a determinação da FTM por um modelo gaussiano.	70
4.10 - FTM das Bandas de 1 a 5 e 7.	73
4.11 - FTM da banda pancromática.	73
4.12 - Área do Lago Pontchartrain em Louisiana, EUA. Landsat-7. Composição colorida 3B4G5R.	75
4.13 - Ponte sobre Lago Pontchartrain em Louisiana, EUA. Landsat-7. Banda Pancromática.	76
4.14 - Modelo de ajuste para a banda 4.	78
4.15 - FTM na frequência de Nyquist analisada por período.	79

4.16 - Metodologia de determinação da FTM por um modelo teórico.	81
4.17 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da varredura do espelho; banda3.....	82
4.18 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da trajetória do satélite; banda 3.....	82
4.19 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da varredura do espelho; banda pancromática.....	83
4.20 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da trajetória do satélite; banda pancromática.....	83
4.21 - EIFOV estimado entre junho de 1999 e maio de 2001.	86
5.1 - Diferentes tipos de interpoladores..	89
5.2 - Interpretação espectral do processo de reconstrução ideal.	90
5.3 - Modelo do processo combinado de restauração-interpolação.	92
5.4 - Função desejada e a FTM do sensor ETM+ (banda 3).....	96
5.5 - Função desejada e a FTM do sensor ETM+ (banda pan).	97
5.6 - Ilustração do projeto do filtro FIR por janelamento.	99
5.7 - Efeito do janelamento.	100
5.8 - Efeito do truncamento (N = 11) sobre a função desejada para diferentes janelas.	101
5.9 - Efeito do truncamento (Janela de Hanning) para diferentes valores de N. .	102
5.10 - Resposta do filtro de restauração antes do truncamento e depois do truncamento para a banda 3.....	103
5.11 - Resposta do filtro de restauração antes do truncamento e depois do truncamento para a banda pancromática.....	103
5.12 - Interface do Aplicativo de restauração.....	105
5.13 - Abrindo um arquivo no aplicativo IMAGE RESTORATION.....	106
5.14 - Visualizando a imagem a ser restaurada.	107
5.15 - Restaurando a imagem.	109
5.16 - Visualizando o resultado final e salvando a imagem restaurada.	110
6.1 - Imagem original da cidade do Rio de Janeiro/RJ, banda 1, pixel = 30 m. ...	115
6.2 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 1, pixel= 15 m.....	116
6.3 - Imagem restaurada, banda 1, pixel = 15 m.	116
6.4 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 2, pixel = 15 m.	117
6.5 - Imagem restaurada, banda 2, pixel = 15 m.....	117

6.6 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 3, pixel = 15m.....	118
6.7 - Imagem restaurada, banda 3, pixel= 15 m.....	118
6.8 - Composição colorida com imagens originais, (1B, 2G, 3R) com pixel = 30 metros.	119
6.9 - Composição colorida com imagens interpoladas por ICC, (1B, 2G, 3R) com pixel = 15 metros. Estádio do Maracanã - RJ.....	119
6.10 - Composição colorida com imagens restauradas, (1B, 2G, 3R) com pixel = 15 metros. Estádio do Maracanã - RJ.....	119
6.11 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.	120
6.12 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 7,5 m.	120
6.13 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 7,5 m.....	121
6.14 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 3.....	123
6.15 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.....	123
6.16 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 3.	126
6.17 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática.	127
6.18 - Imagem original da cidade de Brasília/DF, banda 4, pixel = 30 m.....	128
6.19 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 4, pixel = 15 metros.	129
6.20 - Imagem restaurada, banda 4, pixel = 15 metros.....	129
6.21 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 metros.	130
6.22 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m. Pista do Aeroporto.....	131
6.23 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m. Pista do Aeroporto.....	131
6.24 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 m.....	132
6.25 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m.	132
6.26 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m.....	133
6.27 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.	134
6.28 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 10 m.	134
6.29 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 10 m.	135
6.30 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 4.....	136
6.31 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.....	136

6.32 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 4.	139
6.33 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática.	140
6.34 - Imagem original Vale do Paraíba/SP, banda 3, pixel = 30m.....	141
6.35 - Imagem interpolada por ICC, banda 3, pixel = 10 m.	142
6.36 - Imagem restaurada, banda3, pixel = 10 m.....	142
6.37 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 m.	143
6.38 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 10 m.	144
6.39 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 10 m.	144
6.40 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.	145
6.41 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 5 m.	145
6.42 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 5 m.	146
6.43 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 3.....	147
6.44 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.....	147
6.45 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 3.	150
6.46 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática	151
6.47 - Resposta do ETM+ (banda 3) modificada pelo filtro de restauração.....	152
6.48 - Resposta do ETM+ (banda pancromática) modificada pelo filtro de restauração.	153

LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 - Características principais do sensor ETM+.....	53
4.2 - Especificação da FTM pra o ETM+.	71
4.3 - Nova Especificação da FTM para o ETM+.....	72
4.4 - Valores de u_w , k_x e EIFOV para o ETM+.	74
4.5 - Parâmetros do modelo de estimação da FTM.	77
4.6 - Parâmetros do modelo do ETM+.	80
4.7 - Valores de k E EIFOV nas direções x e y para o ETM+ (Valores coletados em 03/06/2002).....	84
4.8 - Valores de k E EIFOV nas direções x e y para o ETM+ (Média dos últimos dados coletados).....	85
5.1 - Valores de u_w para o ETM+.	96
5.2 - Coeficientes do filtro de restauração.	104
6.1 - Relação das áreas de estudo e imagens utilizadas em cada caso.....	112
6.2 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo I – Rio de Janeiro/RJ.	124
6.3 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo II – Brasília/DF.	138
6.4 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo III – Vale do Paraíba/SP.....	149
6.5 - Valores de EIFOV após o processamento para o ETM+. Método teórico apoiado em dados experimentais.	154

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

\hat{f}	– estimativa de f
Δx	– intervalo de amostragem
ciclos/m	– ciclos por metro
ciclos/pixel	– ciclos por pixel
D	– função desejada
d	– tamanho do detector
EIFOV	– Effective Instantaneous Field Of View
ETM+	– Enhanced Thematic Mapper
f	– distribuição espectral da cena
FEP	– Função de Espalhamento Pontual
FIR	– Finite Impulse Response
FOV	– Field Of View
FPB	– Filtro Passa-Baixas
FT	– Função de Transferência
FTF	– Função de Transferência de Fase
FTM	– Função de Transferência de Modulação
g	– imagem
h	– resposta impulsiva do sistema
h'	– resposta impulsiva do sistema modificado
ICC	– Interpolador de Convolução Cúbica
IFOV	– Instantaneous Field Of View

j	– função janela
k	– parâmetro do modelo gaussiano para a FTM
m	– metro
MSS	– Multispectral Scanner
n	– ruído aditivo
N	– tamanho do filtro
p	– resposta impulsiva do filtro
P	– transformada de Fourier de p
S	– função de amostragem
TM	– Thematic Mapper
u	– frequência espacial
u_a	– frequência de amostragem
u_c	– frequência de corte
u_w	– frequência normalizada para a qual a FTM é igual a 0,5
VMP	– Vizinho Mais Próximo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As primeiras experiências relacionadas com imagens digitais foram realizadas no início da década de 20 com o envio, via cabo submarino, de fotografias digitalizadas entre a Europa e os Estados Unidos (Gonzalez & Woods, 2000). No entanto, a tecnologia de processamento digital de imagens (PDI) não foi amplamente estudada até a década de 60, quando as primeiras plataformas espaciais foram lançadas e uma forma mais adequada de aquisição, armazenamento e transmissão de imagens foi desenvolvida. Naturalmente, este desenvolvimento ocorreu paralelamente ao aperfeiçoamento dos computadores digitais, que progressivamente foram se tornando mais rápidos e capazes de armazenar mais dados. Desde esta época, o processamento digital de imagens evoluiu bastante, e hoje tem aplicações em diversos campos. Atualmente, técnicas de processamento de imagens são utilizadas para descobrir focos de queimadas, para detectar doenças do olho humano, para ajudar na restauração e conservação de obras de arte, e para colorizar filmes produzidos originalmente em preto e branco, tendo aplicações em áreas que vão da biologia à estatística, da astronomia à biomedicina, e da editoração eletrônica ao geoprocessamento.

Mascarenhas & Velasco (1984) definem Processamento Digital de Imagens como uma área interdisciplinar que agrega conhecimentos de Engenharia Elétrica, Colorimetria, Neurofisiologia, Ótica e Ciência da Computação. Neste trabalho, uma atenção especial será dada às áreas de Processamento de Sinais, Ótica e Computação, sendo que o objeto principal de estudo são as imagens geradas por sensores a bordo de satélites de recursos naturais. Estas imagens são produtos da tecnologia chamada Sensoriamento Remoto, que vem sendo amplamente utilizada desde os primeiros avanços no campo da ótica, passando pelo desenvolvimento de aviões, plataformas espaciais e de sensores cada vez mais sofisticados.

As imagens de sensores orbitais e fotografias aéreas apresentam a característica de agrupar um elevado número de informações, freqüentemente não disponíveis nos mapas oficiais. Contudo, as informações oriundas do sensoriamento remoto, freqüentemente, necessitam ser processadas para melhorar a qualidade radiométrica e geométrica dos dados. As distorções radiométricas são causadas pelo borramento de detalhes, listras, manchas na imagem, etc. As degradações na imagem diminuem a precisão da informação, reduzindo, assim, a utilidade dos dados. Portanto, antes que os dados de imagem sejam utilizados, é necessário que passem por um estágio de pré-processamento para que sejam corrigidos geométrica e radiometricamente. Um esquema simplificado dos estágios de processamento de imagens é apresentado na Figura 1.1.

Dentre as técnicas de correção radiométrica, encontra-se a restauração radiométrica de imagens. Entende-se por restauração a tarefa de estimar uma imagem que sofreu um processo de degradação. Para algumas aplicações em sensoriamento remoto, a aproximação da imagem original sobre uma grade mais fina torna-se necessária. Para a geração destas imagens, técnicas de interpolação tais como a do Vizinho Mais Próximo, Bilinear e Convolução Cúbica são, geralmente, utilizadas.

Uma idéia interessante é a combinação dos processos de restauração e interpolação para gerar imagens com melhor resolução espacial efetiva sobre uma grade mais fina que a imagem original (Fonseca, 1988). Este método tem sido muito utilizado em várias aplicações de sensoriamento (Miranda, 2000, Gherardi et al., 2001; Carvalho & Gherardi, 2003; Simi et al., 2003).

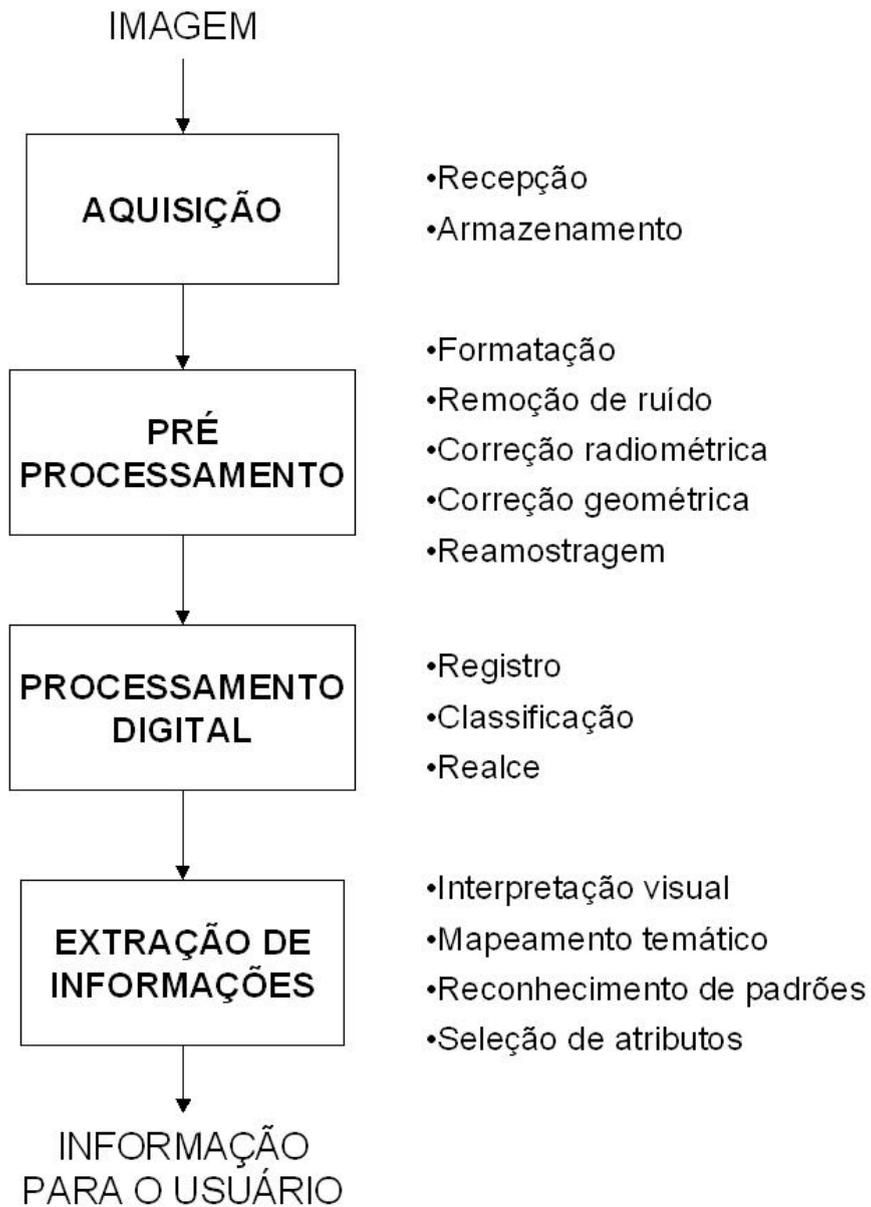


FIGURA 1.1 - Esquema dos estágios de processamento de imagens.
 FONTE: Adaptada de Fonseca (1988).

1.1 Proposta do Trabalho

O problema de restauração de imagens tem sido tema de estudo há muitos anos. Vários métodos de restauração de imagens têm sido propostos na literatura (Zhou et al., 1988; Guan e Ward, 1989; Bumbaca e Smith, 1988; Schutten e Vermeij, 1980; Boulton e Woulberg 1993; Reichenbach et al., 1993; Starck et al., 1995; Pham, 2001), entretanto, poucos têm sido utilizados para resolver problemas reais na área de processamento de imagens de sensoriamento remoto. Acredita-se que isto se deva à complexidade do problema de restauração e, conseqüentemente, às soluções que computacionalmente se mostram mais difíceis de serem implementadas, sendo que muitas das vezes não se consegue grandes melhorias nos resultados. Considerando que já existe implementado no sistema SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), que é um software desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), um método de restauração aplicado às imagens TM do Landsat-5 e SPOT, que tem sido usado de forma satisfatória e que é bastante simples, decidimos usar a mesma metodologia neste trabalho para a restauração de imagens ETM+. Além disso, não têm sido encontrados na literatura métodos de restauração implementados na prática e que estejam sendo usados operacionalmente para restauração de imagens de satélites.

Portanto, a proposta deste trabalho é avaliar a resolução efetiva do sensor ETM+ e implementar um filtro de restauração para imagens do Landsat-7. A teoria sobre a qual este trabalho de pesquisa se fundamenta, principalmente, nos trabalhos de Fonseca et al. (1993) e Storey (2001).

O método de restauração proposto por Fonseca (1988) é específico para imagens geradas pelos sensores MSS e TM do Landsat-5. Storey (2001) modela a Função de Transferência de Modulação (FTM) da ótica, detector e filtro eletrônico do sensor ETM+ (Landsat-7) e apresenta um perfil da degradação deste sensor durante os primeiros anos de funcionamento em órbita.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar e avaliar a FTM (Função de Transferência de Modulação) do sensor ETM+ e conseqüentemente avaliar também a resolução espacial do sistema através do parâmetro EIFOV (*Effective Instantaneous Field Of View*).
- Implementar filtros digitais de restauração para cada uma das bandas do sensor ETM+;
- Comparar o desempenho do filtro combinado de interpolação e restauração com o método de interpolação por Convolução Cúbica.

1.2 Organização da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos considerados importantes para a compreensão dos experimentos realizados, tais como o processo de formação de imagens, EIFOV e Transformada de Fourier.

No Capítulo 3, o problema de restauração de imagens sob aspectos matemáticos é apresentado. O método do filtro inverso modificado utilizado neste trabalho é analisado, mostrando suas principais características.

Uma descrição do sistema Landsat-7 e dos métodos de estimação das funções de transferência do sensor ETM+ são apresentados, avaliados e validados no Capítulo 4. Detalhes sobre as principais degradações do sistema sensor também são descritas neste capítulo.

No Capítulo 5 é apresentado o processo combinado de interpolação e restauração. Esta operação requer o projeto de um filtro digital com entrada e saída definidas sobre grades de amostragem diferentes, o qual envolve a teoria de projeto de filtros digitais em múltiplas taxas de amostragem.

O Capítulo 6 mostra alguns resultados da restauração de imagens do ETM+ do satélite Landsat-7. As imagens restauradas são comparadas com as imagens interpoladas através do operador de Convolução Cúbica. Foi verificada a

melhor qualidade espacial das imagens restauradas em relação às imagens interpoladas com o método de Convolução Cúbica.

Finalmente, conclusões, uma visão geral do trabalho e alguns comentários são apresentados no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma descrição completa do problema de restauração requer uma discussão dos conceitos de formação de imagens e a descrição da mesma pelo ponto de vista de sistemas lineares e transformada de Fourier.

Comumente, avalia-se o desempenho de um sistema de imageamento através da descrição da resposta do sistema. Uma ferramenta útil para este propósito é a teoria de filtros lineares, usada para analisar respostas de sistemas lineares que são estáveis e invariantes com o deslocamento (Fonseca, 1988).

Portanto, é interessante e possível fazer uma analogia entre sistemas de formação de imagens e filtragem linear espacial, o que parece facilitar a compreensão da abordagem conceitual e matemática utilizada para os processos de formação de imagens e restauração.

2.1 Processo de Formação de Imagens

Uma cena é definida como uma entidade bidimensional que emite ou reflete energia radiante. A energia pode ser de uma variedade de formas como, por exemplo, energia óptica, energia acústica ou energia em forma de partículas nucleares (Ekstrom, 1984).

De acordo com Novo (1988), o que se registra, basicamente, em sensoriamento remoto é a energia radiante (REM) que deixa a superfície em direção ao sistema sensor. É importante conhecer como essa energia se modifica espectralmente e espacialmente numa determinada área. O fluxo que deixa a superfície é medido durante certo intervalo de tempo. Geralmente este intervalo de tempo é constante, o que faz com que diferenças radiométricas de cena para cena sejam devidas a modificações no fluxo radiante registrado. Este esquema é ilustrado na Figura 2.1.

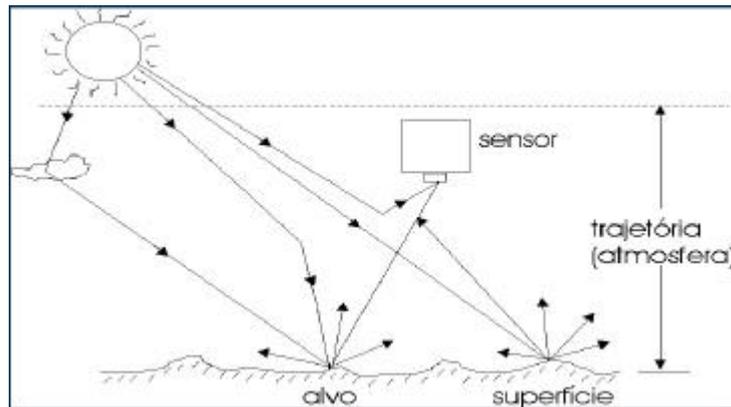


FIGURA 2.1 - Esquema da captura da REM pelo sensor.

A intensidade da energia refletida por uma determinada substância é dependente do comprimento de onda, do ângulo de incidência, da polarização, da radiação e das propriedades elétricas, químicas e biológicas da substância refletora. O comprimento de onda, o ângulo de incidência e a polarização são propriedades da energia eletromagnética e podem ser controladas, até certo ponto, pelo projeto do sistema sensor. Entretanto, a refletividade de uma substância ou alvo depende, além dos parâmetros anteriores, das propriedades elétricas (constante dielétrica, condutividade e permeabilidade) e da textura do alvo. Embora a reflexão seja tratada como se ocorresse na superfície do material, de fato ela envolve uma penetração e uma interação da radiação com uma camada, embora muito fina, da substância. Mesmo a reflexão que ocorre em superfícies metálicas é realizada em uma camada sub-milimétrica do material. De qualquer forma, a reflexão é tratada como um fenômeno de superfície.

Um sistema de imageamento pode ser entendido como uma “caixa preta” capaz de coletar a energia radiante refletida ou emitida pela cena (Hunt, 1984) como mostra a Figura 2.2.

Este sistema tem a função de carregar para o foco a energia interceptada e produzir uma imagem que é uma representação do objeto original que emite ou

reflete a energia, produzindo uma imagem digital representada em termos de uma matriz de números, como ilustra a Figura 2.3.

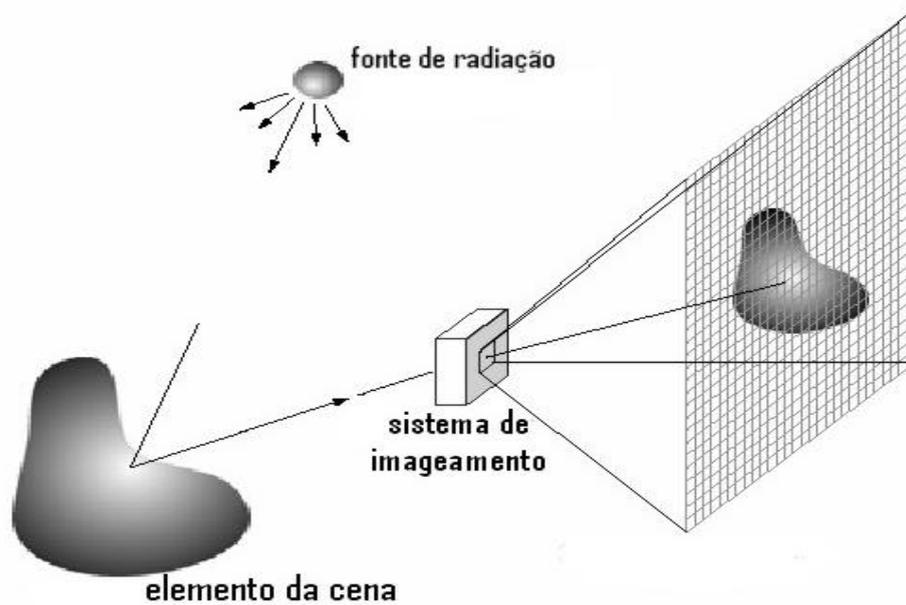


FIGURA 2.2 - Esquema do processo de formação de imagem.
FONTE: Adaptada de Gonzalez & Woods (2000).

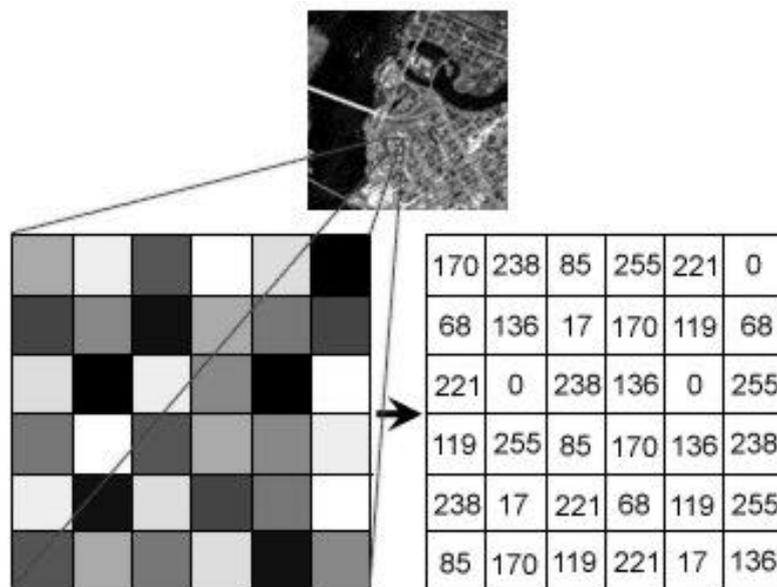


FIGURA 2.3 - Representação do objeto em termos de uma matriz numérica.
FONTE: Gonzalez & Woods (2000).

2.1.1 Caracterização de Imagens

A medida da radiância representada em cada pixel (elemento da imagem) pelo seu nível de cinza, não é apenas a da radiação refletida pela superfície contida na cena do pixel, mas também parte da radiação que ocorre devida aos fenômenos de espalhamento de luz e efeitos atmosféricos.

A quantificação da radiância contínua de uma cena é representada pelos níveis de cinza discretos na imagem digital, e, é dada por um número de bits por pixel. (Schowengerdt, 1997).

Na realidade o nível de cinza é representado pela radiância média de uma área relativamente pequena em uma cena. Esta área é determinada pela altitude do sistema sensor a bordo do satélite e outros parâmetros como o IFOV (Instantaneous Field Of View). O IFOV corresponde à área sobre o terreno que é “vista” por cada um dos detectores do sistema sensor a uma dada altitude num certo instante de tempo. O IFOV pode ser mensurado de duas maneiras: em relação ao ângulo de incidência (IFOV angular) ou em relação a uma distância no terreno (X,Y), comumente chamada de resolução espacial (IFOV linear), ou resolução espacial nominal, conforme é mostrado na Figura 2.4.

Deve-se atentar para o fato de que a resolução não estabelece o tamanho do menor objeto que pode ser detectado na imagem. Por exemplo, em imagens obtidas pelo sensor ETM+, do Landsat-7, que possui resolução espacial nominal de 30 metros, objetos menores que esta medida podem aparecer nestas imagens, embora não possam ser observados com boa definição. Portanto, é possível ver um objeto menor que o definido pela resolução espacial nominal da imagem. Por exemplo, pode-se ver linhas nas imagens que poderiam ser ruas, estradas, rios, etc, mas, a menos, que se tenha mais informação sobre este objeto não se pode inferir com precisão o que é este objeto.

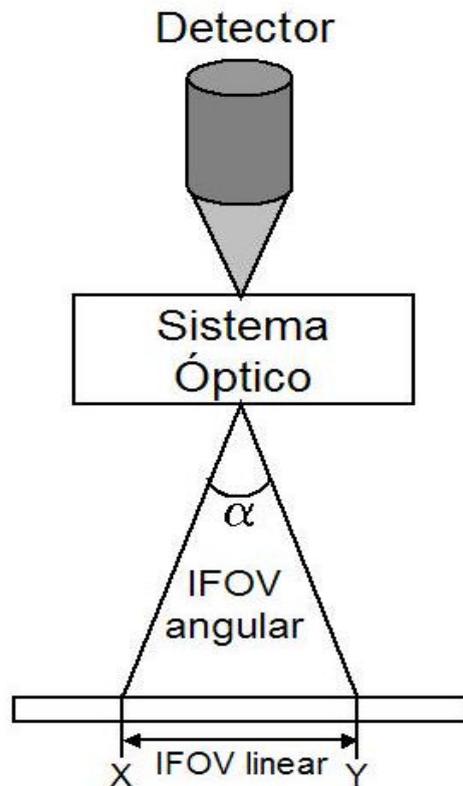


FIGURA 2.4 - Definição de IFOV.

Um modo de avaliar a FTM de um sistema é através de um parâmetro de dimensão espacial conhecido como EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*). Por definição, o EIFOV equivale ao inverso do dobro da frequência espacial para a qual a FTM é igual a 0,5, como mostra a figura 2.5.

$$\text{EIFOV} = \frac{1}{2 \cdot u_w} \cdot \text{PIXEL}, \quad (2.1)$$

onde u_w é frequência espacial em que a FTM é igual a 0,5 e PIXEL é o tamanho do pixel em metros.

Esta medida é comparável à largura da resposta impulsiva do sistema na metade de seu valor máximo. Ambas as medidas correspondem, aproximadamente, à resolução espacial efetiva do sensor, que geralmente é pior que o IFOV linear do sensor (resolução espacial nominal). A resolução

efetiva do sensor leva em conta outros fatores que também contribuem para a degradação da resolução espacial nominal, tais como os efeitos da óptica, detector, eletrônica, processo de amostragem e outras condições adversas (movimento da plataforma ou turbulência). Deve ser lembrado que nenhum número completamente especifica a resolução de um sistema tal como o ETM+; o EIFOV é somente uma medida do desempenho de um sistema, que é particularmente pessimista com relação à detectabilidade de detalhes em cena e de alto contraste.

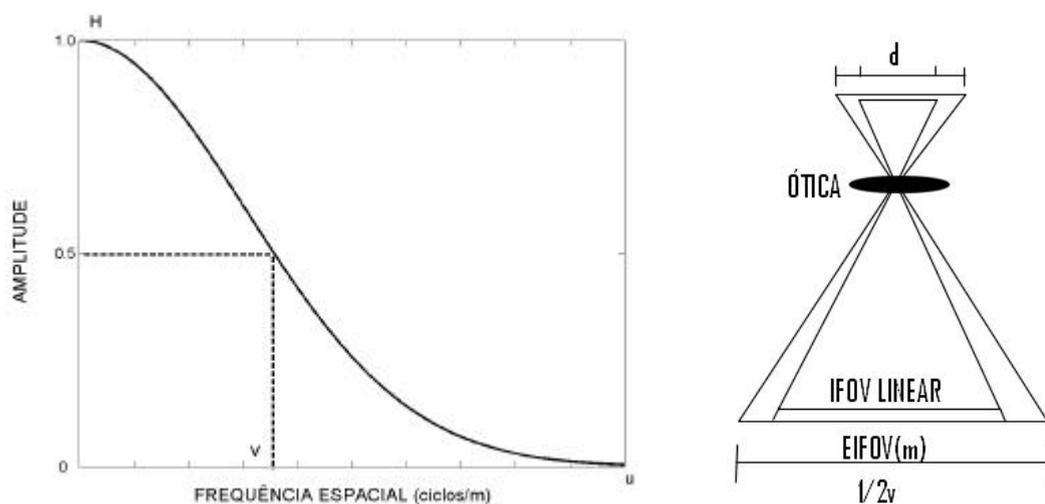


FIGURA 2.5 - Definição de EIFOV; d é a dimensão do detector.

2.1.2 Caracterização Matemática

A distribuição espacial de radiância espectral da cena vista como uma função Real de duas variáveis reais, f , sofre uma operação de transformação pelo sistema de formação de imagens, representada por ψ , produzindo uma nova função chamada de imagem:

$$g = \psi[f]. \quad (2.2)$$

A descrição do processo de formação de imagens nas condições matemáticas mais simples requer que se assuma a hipótese de que o sistema de

imageamento possui duas características: linearidade e invariância em deslocamento.

Um sistema \mathcal{H} é “linear” se, dadas duas imagens I e J e dois escalares a e b , ocorrer:

$$\mathcal{H}(aI + bJ) = a\mathcal{H}(I) + b\mathcal{H}(J), \quad (2.3)$$

onde o produto de um escalar por uma imagem é definido como o produto de cada ponto pelo escalar. Este sistema \mathcal{H} é considerado invariante em deslocamento se:

$$\mathcal{H}(I)(x + a, y + b) = \mathcal{H}(I')(x, y), \quad (2.4)$$

onde $I'(x, y) = I(x + a, y + b)$.

Ou seja, a imagem da cena transladada coincide com a imagem transladada.

De acordo com esta hipótese é possível descrever a formação de imagens pela seguinte equação:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - x_1, y - y_1) f(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (2.5)$$

Os termos nessa equação têm o seguinte significado: a função f representa a distribuição bidimensional da energia correspondente ao objeto original, a função g é a representação de f que é gerada pelo processo de formação de imagens e a função h é a mais importante, já que representa todo o comportamento do sistema de formação de imagens. Esta função é conhecida como função de espalhamento pontual (FEP) em termos de óptica. A FEP corresponde à imagem de uma fonte pontual ideal no plano objeto, e descreve o comportamento do sistema no domínio do espaço. É perfeitamente análogo à função de resposta impulsiva usada na análise de sistemas lineares temporais, mas é estendido a duas dimensões para sistemas lineares espaciais.

Se o processo de formação de imagens é considerado linear e invariante, a saída g pode ser descrita como a convolução da resposta impulsiva do sistema h com o sinal de entrada f :

$$g = h * f, \quad (2.6)$$

onde o símbolo $*$ indica a operação de convolução.

A convolução é fundamental na análise da relação (função de transferência) entre as variáveis de entrada e de saída de sistemas lineares.

A formação de imagens é um processo de capturar e focalizar a energia radiante e, portanto trata-se de um fenômeno passageiro (Anil, 1989). Desta forma, é necessário usar alguns mecanismos de gravação que têm a capacidade de capturar esta energia em uma representação de tempo e fazer um registro permanente para uso posterior.

2.2 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é uma ferramenta fundamental na análise de sistemas lineares devido à sua simplicidade de representação matemática e capacidade de ressaltar aspectos fundamentais do comportamento do sistema.

Uma função periódica, g , pode ser representada como uma soma ponderada discreta infinita de senos e co-senos de freqüências diferentes. Sendo assim, um sinal representado no domínio espacial, pode ser representado no domínio da freqüência. Para funções não periódicas a soma discreta infinita apresenta-se em integral da forma (Gonzalez & Woods, 2000):

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (2.7)$$

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv, \quad (2.8)$$

onde u e v são as coordenadas em frequência espacial. O operador exp representa a função exponencial. Esta representação é conhecida por série de Fourier. Portanto, F é a transformada de Fourier de f e é conhecida, também, como espectro espacial de f . Já a transformação que associa f a F através da Equação 2.8 é chamada Transformada de Fourier Inversa. A Figura 2.6 ilustra uma função simples e seu espectro de Fourier. Quanto mais componentes (senos e co-senos) para representar a onda quadrada, melhor é a aproximação desta onda. A Transformada de Fourier de um sinal é uma função complexa. Quanto maiores as frequências que compõem a imagem, mais detalhes esta possui. Então, no domínio espacial, as componentes em frequências altas de um sinal podem ser interpretadas como as variações mais rápidas do sinal, os detalhes. Se uma imagem é homogênea significa que ela possui, principalmente, componentes de frequências baixas.

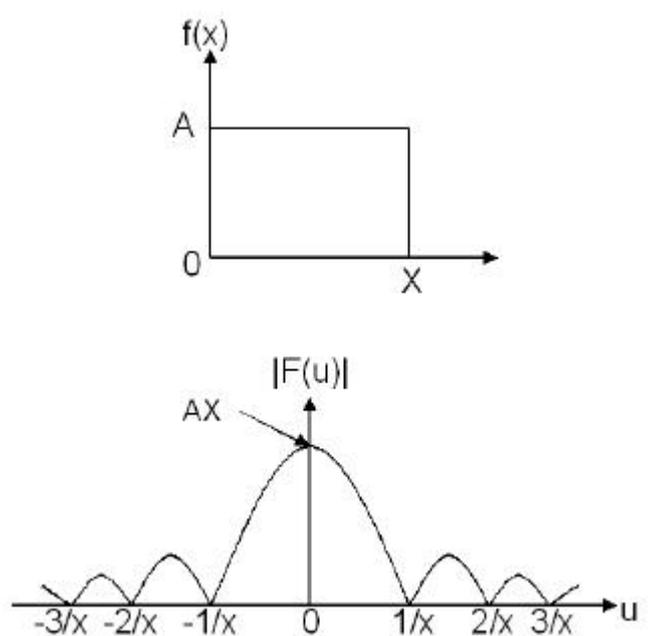


FIGURA 2.6 - Uma função simples e seu espectro de Fourier.
 FONTE: Adaptada de Gonzalez & Woods (2000).

2.3 Análise em Frequência

A Equação 2.6 pode ser representada no domínio da frequência por:

$$G = H \cdot F, \quad (2.9)$$

onde G, H e F são as transformadas de Fourier de g, h e f respectivamente.

O teorema da convolução afirma que a transformada de Fourier de duas funções convoluídas no domínio do espaço é igual ao produto das transformadas de Fourier das duas funções no domínio da frequência, onde o operador \cdot denota a operação de produto. Este teorema é de grande importância na área de processamento de imagens.

A função H é conhecida como a função de transferência do sistema, e descreve o comportamento do sistema sobre a cena no domínio da frequência. A função de transferência é, freqüentemente, análoga a um filtro passa-baixas, o qual atenua as amplitudes das componentes em freqüências altas, produzindo uma imagem que é uma versão borrada da imagem original. H é uma função complexa e pode ser escrita na forma:

$$H = |H| \cdot \exp(i\phi), \quad (2.10)$$

onde $|H|$ e ϕ são o módulo e a fase de H conhecidos por Função de Transferência de Modulação (FTM) e Função de Transferência de Fase (FTF), respectivamente. Quando a FEP é simétrica, então o sistema imageador pode ser caracterizado apenas pelo seu módulo, ou seja, a FTM.

A função de transferência de modulação de um sistema imageador é de fundamental importância na especificação e projeto de um sistema, e na análise detalhada das imagens que ele produz. Pode ser considerada como uma medida de habilidade com que o sistema recria o conteúdo de frequência espacial de uma cena (Fonseca, 1988).

Um ponto importante a ser mencionado é o critério de *Nyquist*, que especifica que um sinal precisa ser amostrado pelo menos duas vezes em cada ciclo de variação. Ou seja, a frequência de amostragem (frequência de *Nyquist*) precisa ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal. Se não for observado este critério, os sinais de mais alta frequência serão erroneamente registrados como de baixa frequência. Por exemplo, em imageamento Doppler,

onde o fluxo do sangue é medido por uma série de pulsos ultra-sônicos, se os pulsos não forem repetidos com rapidez suficiente, um fluxo rápido em uma direção pode ser interpretado como um fluxo lento na direção oposta (Kepler, 1998). Mais detalhes sobre a teoria de amostragem consultar Park et al. (1984), Rabiner e Gold (1975), Rosenfeld e Kak (1982), Oppenheim e Schaffer (1975).

CAPÍTULO 3

RESTAURAÇÃO DE IMAGENS

Segundo Mascarenhas & Velasco (1984), o problema de restauração de imagens consiste na tarefa de estimar uma imagem que sofreu um processo de degradação, que envolve algum tipo de espalhamento de luz e contaminação por ruído. De maneira semelhante, Katsaggelos (1989) descreve como objetivo da restauração de imagens, recuperar a cena original que sofreu um processo de degradação. As técnicas de restauração são orientadas para uma modelagem das degradações, e conseqüente aplicação de um procedimento inverso para obter a aproximação da cena original.

O problema de restauração de imagens tem sido tema de estudo há muitos anos. Métodos de restauração de imagens têm sido propostos na literatura (Zhou et al., 1988; Guan e Ward, 1989; Bumbaca e Smith, 1988; Schutten e Vermeij, 1980; Boulton e Woulberg 1993; Reichenbach et al., 1993; Starck et al., 1995; Pham, 2001), mas, devido à complexidade do problema de restauração, poucos métodos têm sido usados efetivamente para resolver problemas reais na área de processamento de imagens de sensoriamento remoto. Algumas considerações em relação ao problema de restauração de imagens devem ser mencionadas:

- Uma técnica de restauração de imagens deve ser otimizada para ser executada em um computador comum, ou seja, com os recursos disponíveis pelo usuário;
- Os requisitos computacionais das técnicas de restauração devem ser aplicados à quantidade de dados de tamanhos substanciais.
- Uma técnica de restauração de imagens tem que ter êxito na presença de informações que estão previamente disponíveis ou deve ser uma técnica que é, relativamente, insensível aos erros quando não se possui conhecimento de uma informação prévia. Isso quer dizer que um método de

restauração é de pequeno uso se ele requer perfeito conhecimento de uma quantidade de informações que não esteja disponível, como por exemplo, o ruído. Contrariamente, um método pode ser considerado executável e de muita utilidade se ele produzir resultados com uma avaliação razoável da quantidade de informações disponíveis.

Os métodos de restauração baseiam-se em um modelo de degradação, enquanto que as técnicas de realce são empíricas e baseiam-se nas limitações do Sistema Visual Humano (SVH).

Na prática, não existem métodos de restauração que obtenham resultados perfeitos, ou seja, que sejam capazes de recuperar perfeitamente a imagem degradada, uma vez que algumas informações (detalhes) são perdidas. Essa afirmação se baseia nos seguintes fatos (Fonseca, 1988):

- No processo de formação de imagens um ruído aleatório é adicionado à informação da cena;
- Devido à propriedade de limitação por difração, o conteúdo em frequência da imagem é limitado pela frequência de corte da lente no sistema imageador.

Diante desses fatores, se a restauração precisa não pode ser possível, o objetivo da restauração, então, é realçar os detalhes que na imagem aparecem suavizados. As degradações inseridas no processo de formação de imagens atuam como filtros passa-baixas, eliminando ou atenuando o conteúdo em altas frequências da cena, responsáveis pelos detalhes da imagem. O que se tem, portanto, é uma cópia borrada da cena. Aplicando o processo inverso do fenômeno de degradação na restauração, obtém-se uma imagem com aspecto realçado. Tem sido gerada muita discussão sobre a escolha de um critério adequado de avaliação da proximidade entre a cena e a imagem. Uma conclusão largamente aceita é de que o critério do Erro Quadrático Médio (EQM) não corresponde muito bem à avaliação subjetiva, já que o Sistema

Visual Humano (SVH) não é, necessariamente, um processador EQM (Fonseca, 1988).

3.1 Problema de Restauração Sob Aspecto Matemático

Uma maneira de modelar o processo de formação de imagens é caracterizá-lo como a saída amostrada de um sistema linear e invariante no espaço mais um ruído aditivo (Fonseca, 1988) (Figura 3.1),

$$g_{\gamma} = [f * h + n] \cdot S_{\gamma} , \quad (3.1)$$

onde g_{γ} é a imagem de saída amostrada, f representa a cena original, h é a função de espalhamento pontual do sistema, n é o ruído aditivo e S_{γ} é uma função de amostragem do tipo:

$S_{\gamma}(x) = \sum d(x - n\Delta x)$, onde Δx é o intervalo de amostragem que define a grade de amostragem usada.

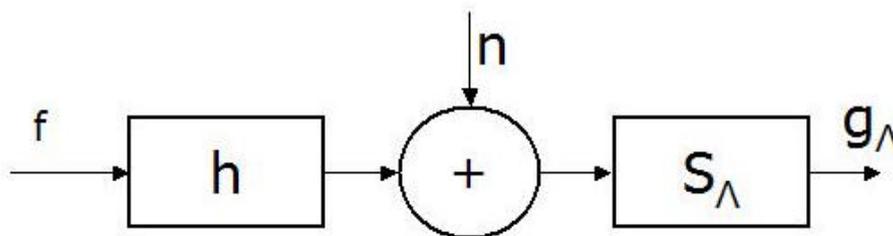


FIGURA 3.1 - Modelo do processo de formação de imagens.
FONTE: Adaptada de Fonseca (1988).

A importância de se usar um modelo de degradação linear e invariante no espaço é que a concepção do processo de restauração de imagens em termos de um filtro espacial linear é possível e desejável. A filtragem espacial linear e invariante, que ocasiona o borrimento, é equivalente à operação de convolução. Então, a implementação no computador de um esquema de

restauração em termos de um filtro espacial se resume na implementação da deconvolução. A possibilidade de se utilizar as ferramentas da teoria de sistemas lineares para a solução de problemas de restauração de imagens é importante no contexto de uma computação simples e rápida.

No domínio da frequência a Equação 3.1 pode ser reescrita como:

$$G_{\gamma}(u) = \frac{1}{\Delta x} \sum_{\bar{n}} F(u - n u_a) H(u - n u_a) + N_{\gamma}(u), \quad (3.2)$$

onde G_{γ} , F , H , e N_{γ} são as transformadas de Fourier de g_{γ} , f , h e $n.S_{\gamma}$ respectivamente. Δx é o intervalo de amostragem e u_a é a frequência de amostragem.

A Equação (3.2) pode ser reescrita na forma,

$$G_{\gamma}(u) = \frac{1}{\Delta x} \sum_{\bar{n}} G(u - n u_a) + N_{\gamma}(u), \quad (3.3)$$

onde $G = F \cdot H$.

Na tentativa de restaurar a imagem degradada, os elementos da imagem são convolvidos com a resposta impulsiva do filtro de restauração p tal que:

$$g_{\gamma}'(x) = \sum_{\bar{n}} g_{\gamma}(x - n \Delta x) p(n). \quad (3.4)$$

O processo de restauração é esquematizado na Figura 3.2, onde g_{γ}' é a imagem restaurada.

Representando p como um “trem” de impulsos pode-se expressar o resultado da convolução discreta como o produto, no domínio das frequências.

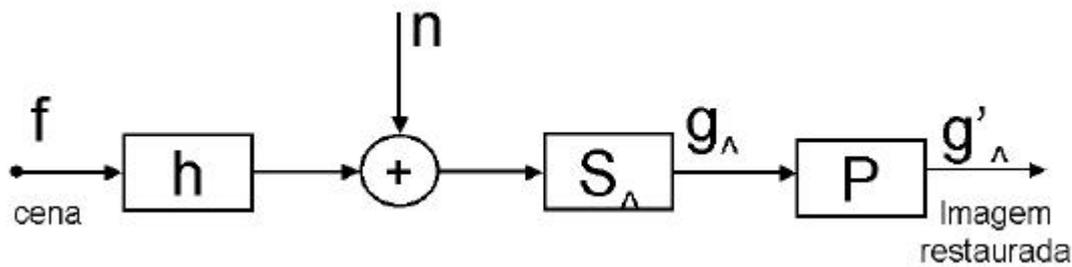


FIGURA 3.2 - Sistema amostrado e o filtro de restauração.
 FONTE: Adaptada de Fonseca (1988).

A transformada de Fourier da Equação 3.4 resulta em:

$$G_{\Delta}'(u) = \left[\frac{1}{T_x} \sum_n F(u - nu_a) H(u - nu_a) + N_{\Delta}'(u) \right] \cdot P(u), \quad (3.5)$$

onde P é a transformada de Fourier de p,

$$P(u) = \sum_n p(n) \cdot e^{-j2\pi n p T_x}. \quad (3.6)$$

Como P é uma função periódica com período u_a ,

$$P(u - mu_a) = P(u), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.7)$$

o espectro da imagem processada definido na Equação 3.5 pode ser reescrito da seguinte forma:

$$G_{\Delta}'(u) = \frac{1}{T_x} \sum_n F(u - nu_a) H(u - nu_a) \cdot P(u - nu_a) + N_{\Delta}'(u), \quad (3.8)$$

onde $N_{\Delta}' = N \cdot P$

Fazendo

$$H' = H \cdot P, \quad (3.9)$$

a Equação 3.8 é modificada para:

$$G_{\gamma}'(u) = \frac{1}{\sum_x} \sum_{\bar{n}} F(u - nu_a) H'(u - nu_a) + N_{\gamma}'(u). \quad (3.10)$$

É fácil verificar que a Equação 3.10 é semelhante à Equação 3.2 que representa o sistema imageador amostrado no domínio da freqüência. Dessa forma, este sistema, ao ser processado por um filtro de restauração, pode ser representado por um sistema equivalente como o da Figura 3.3, onde a função de transferência resultante H' , dada pela Equação 3.9, é uma forma melhorada de H . Ou seja, a Equação 3.9 indica que a função de transferência do sistema é modificada por P .

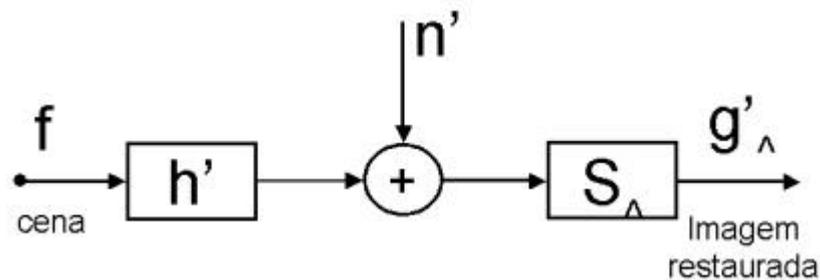


FIGURA 3.3 - Representação equivalente do sistema amostrado seguido pelo filtro de restauração.
 FONTE: Adaptada de Fonseca (1988).

Então, a restauração pode ser vista como o processo de filtragem espacial, onde o filtro de restauração, P , “reformata” o espectro do sistema. A Figura 3.4 ilustra este processo nos domínios espacial e da freqüência.

O objetivo da restauração de imagens, no caso ideal, é projetar um filtro espacial que modifique H de tal maneira que:

$$H' = \begin{cases} 1 & |u| \leq u_c \\ 0 & \text{fora,} \end{cases} \quad (3.11)$$

onde u_c é a freqüência de corte do sistema H , definida pela limitação da óptica/eletrônica do sistema. Isto quer dizer que o sistema modificado deve se

comportar como um filtro ideal, deixando passar todas as componentes em frequência da cena na banda de interesse $|u| \leq u_c$, sem modificá-las.

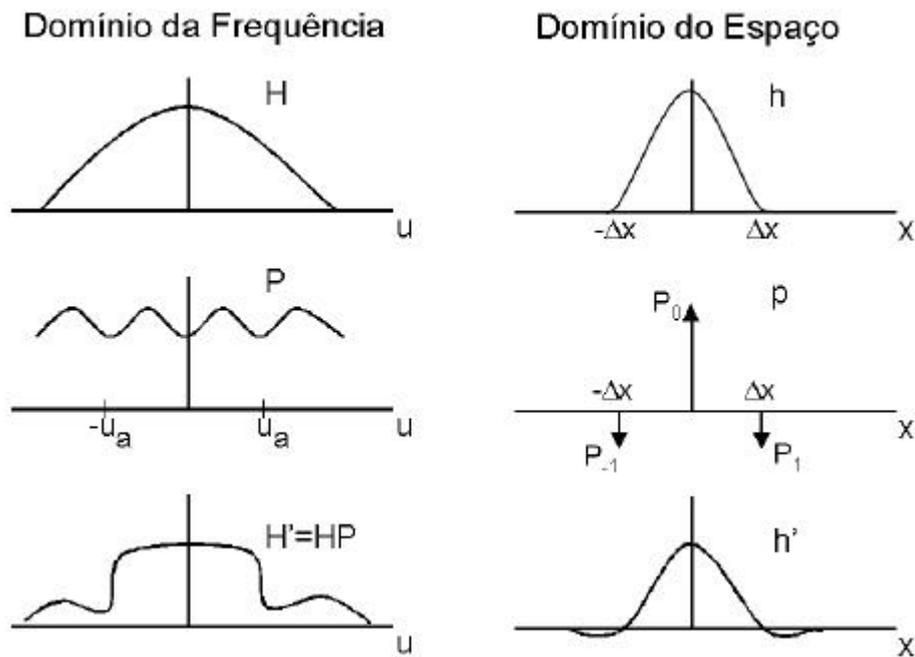


FIGURA 3.4 - Modificação da resposta do sistema pelo processo de restauração.

FONTE: Adaptada de Sellner (1971).

Como, na prática, é impossível projetar um filtro de restauração ideal, o que se faz é projetar um filtro que se aproxime do ideal. Portanto, o processo de restauração pode ser visto como um projeto de um filtro espacial, no domínio do espaço ou da frequência, que atenda os requisitos de filtragem ideal, considerando as limitações da implementação prática.

3.2 Filtro Inverso Modificado

Nas condições ideais de linearidade, ausência de ruído e invariância no espaço, a Equação 2.9 é válida, e, portanto, verifica-se que é possível recuperar a imagem original pela razão entre as transformadas de Fourier da

imagem degradada e da função de espalhamento (Mascarenhas & Velasco, 1984).

O filtro de restauração $P(u)$ ideal é o filtro inverso:

$$P(u) = \begin{cases} 1/H(u) & |u| \leq u_c \\ 0 & \text{fora,} \end{cases} \quad (3.12)$$

Entretanto, o filtro inverso é instável, já que do ponto de vista da óptica, as funções de transferência tendem a ser pequenas ou zero nas altas frequências o que ocasionaria uma resposta do filtro tendendo ao infinito (Fonseca, 1988). Outro problema que pode ocorrer é que na presença de ruído a Equação 2.9 resulta em:

$$G = F \cdot H + N. \quad (3.13)$$

Pela filtragem inversa, temos que:

$$P = \frac{G}{H} = F + \frac{N}{H}. \quad (3.14)$$

Nas vizinhanças dos zeros de H , o segundo termo, devido ao ruído, tende a predominar sobre o sinal F .

A instabilidade numérica que ocorre no filtro inverso devido à presença de zeros em H e do ruído N está intimamente ligada ao fato da equação que caracteriza a degradação da imagem, ser essencialmente um problema de mau condicionamento, podendo pequenas perturbações na imagem degradada provocar grandes variações na imagem restaurada.

Uma solução atraente para este tipo de problema é a utilização de algum tipo de conhecimento a priori sobre a imagem original. O Filtro Inverso Modificado ou Compensação da Função de Transferência é uma aproximação do filtro inverso, que procura controlar os problemas associados a ele (Arguello et al., 1972).

Esta técnica sugere que seja escolhida uma função que se desejaria que o sistema tivesse como resposta, o que minimizaria o efeito do mau-condicionamento. Assim,

$$H' = D = H \cdot P, \quad (3.15)$$

onde D seria a função de transferência desejada do sistema.

A função D deve ter um comportamento melhor que H. Selecionada D, P pode ser facilmente estimada:

$$P(u) = \begin{cases} D(u)/H(u) & |u| \leq u_c \\ 0 & \text{fora,} \end{cases} \quad (3.16)$$

Portanto, a transformada inversa de P, p, é uma função que quando convolvida com a cena degradada resulta em uma imagem \hat{f} próxima de f no domínio do espaço.

Uma vantagem do método da compensação da função de transferência é que o seu procedimento não é dependente das estatísticas da imagem. Entretanto, P é mais eficiente quando a relação Sinal/Ruído na imagem é alta, pois não existe um controle do ruído. Para uma relação de sinal/ruído alta, estes filtros podem ser considerados ótimos, ou aproximadamente ótimos (Sellner, 1971). Esta hipótese é válida para imagens obtidas por sensores ópticos que apresentam, em geral, uma boa relação sinal/ruído.

CAPÍTULO 4

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SENSOR ETM+

A função de transferência de um sistema imageador pode ser considerada como o produto das funções de transferência dos subsistemas que a compõem. Em um sistema imageador, basicamente, podem ser identificados os seguintes subsistemas: óptico, detector e filtro eletrônico. Este capítulo apresenta a função de transferência do sensor ETM+ do Landsat-7, bem como alguns métodos utilizados para determiná-la. O parâmetro EIFOV é, aqui, calculado e apresentado.

4.1 Sensor ETM+ do Landsat-7

O sistema Landsat-7 é o mais recente satélite em operação do programa Landsat, financiado pelo governo americano. A Figura 4.1 ilustra o satélite Landsat-7 em operação. O satélite foi lançado em 15 de abril de 1999, com um novo sensor a bordo denominado ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). A operação do satélite em órbita é administrada pela NASA (*National Space and Space Administration*) e sua produção e comercialização de imagens ficam sob os cuidados da USGS (*United States Geological Survey*). A sua vida útil está prevista para ser superior a 6 anos em órbita.

Uma imagem Landsat-7 ETM+ é composta por 8 bandas espectrais que podem ser combinadas em várias composições coloridas. Entre as principais melhorias técnicas em relação ao Landsat-5, plataforma antecessora ao Landsat-7, destaca-se a adição de uma banda espectral (banda pancromática) com resolução nominal de 15 metros, perfeitamente registrada com as demais bandas, melhorias nas características geométricas e radiométricas, o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 metros e a adição de dois calibradores solares.

Esses avanços tecnológicos permitem qualificar o Landsat-7 como sendo o satélite mais interessante para a geração de imagens com aplicações diretas até a escala 1:25000, em áreas rurais principalmente, mesmo em grandes extensões de território, como é o caso do Brasil.

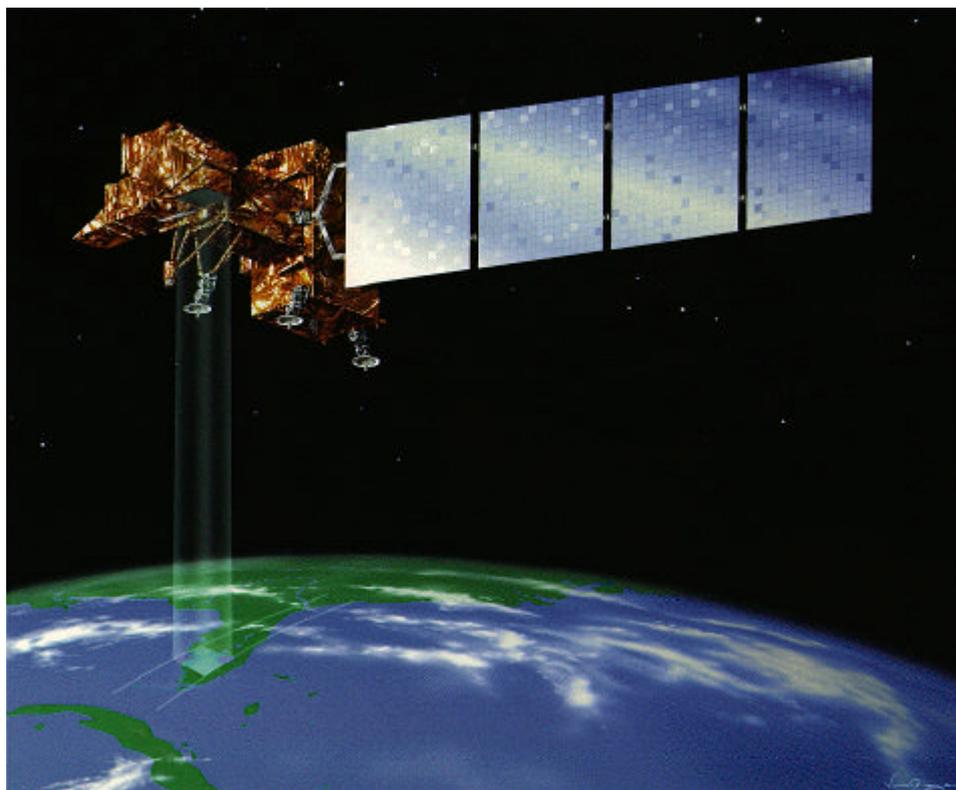


FIGURA 4.1 - Ilustração do satélite Landsat-7.
FONTE: ESD and ECF Information (2003).

O sistema Landsat-7 pode adquirir imagens numa área que se estende desde 81° de latitude norte até 81° de latitude sul e obviamente, em todas as longitudes do globo terrestre. Uma órbita do Landsat-7 é realizada em aproximadamente 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas na Terra por dia, e a cobertura total do nosso planeta sendo completada em 16 dias. A órbita é descendente, ou seja, de norte para sul, com o satélite cruzando a linha do Equador entre 10:00 e 10:15 (hora local) em cada passagem. O Landsat-7 é heliosíncrono, ou seja, sempre passa num mesmo local dado o mesmo horário solar.

Outro fato importante, é que o satélite Landsat-7 tem o mesmo período de revisita que o Landsat-5 (16 dias), e a sua órbita é de tal maneira que possui a mesma grade de referência do Landsat-5 (WRS2) e tem a mesma área imageada (185 x 185 km por cena). A conservação destes parâmetros técnicos facilita a integração no processamento das imagens do Landsat-7 com dados históricos do Landsat-5 existentes desde 1985.

A Tabela 4.1 apresenta as principais características do sensor ETM+.

TABELA 4.1 - Características principais do sensor ETM+.

Parâmetro do Sensor	ETM+
Bandas Espectrais (μm)	Banda (1) 0.45 - 0.52 Banda (2) 0.53 - 0.61 Banda (3) 0.63 - 0.69 Banda (4) 0.78 - 0.90 Banda (5) 1.55 - 1.75 Banda (6) 10.4 - 12.5 Banda (7) 2.09 - 2.35 Banda (8) 0.52 - 0.90
Resolução Espacial Nominal (IFOV linear)	30 metros (bandas 1 a 5 e 7) 60 metros (banda 6) 15 metros (banda pancromática)
Número de detectores	16 para as bandas (1 a 5 e 7) 8 para a banda 6 32 para a banda pancromática
Resolução de codificação	8 bits (256 níveis)

A Figura 4.2 mostra um exemplo de imagens obtidas pelo Landsat-7 nas bandas 1 (Figura 4.2a), banda 2 (Figura 4.2b) e banda 3 (Figura 4.2c) da região que abrange o litoral do estado de São Paulo. Já a Figura 4.2d é a composição colorida 1B, 2G, 3R das bandas.



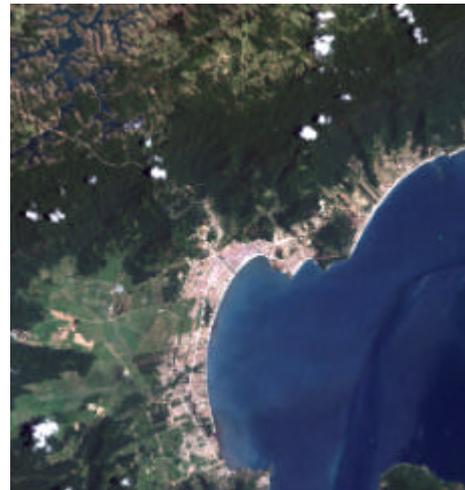
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 4.2 - Litoral do Estado de São Paulo.

A banda Pancromática (Figura 4.3) é a grande novidade no Landsat-7. A sua resolução espacial nominal de 15 m registrada com as demais bandas permite que as imagens geradas pelo sensor ETM+ do Landsat-7 sejam trabalhadas para ampliações até escala 1:25000. Esta banda tem a característica de apresentar uma imagem de boa separabilidade dos alvos de interesse tanto em área rural como em área urbana.



FIGURA 4.3 - Exemplo de imagem Pancromática do Landsat-7. Cidade do Rio de Janeiro.

Os principais componentes do sensor ETM+ são: um módulo com um espelho de varredura (scan mirror), um telescópio Ritchey-Chretien, um corretor de amostragem de linhas, um plano focal principal, relé óptico, um plano focal frio, um módulo de refrigeração e filtros espectrais. Estes componentes são ilustrados na Figura 4.4 e serão apresentados a seguir.

- Espelho de varredura

É o módulo encarregado de rastrear as linhas de aproximadamente 185 km. Consiste em um espelho liso suportado por dois pivôs flexíveis, um de cada lado. O ângulo de varredura é monitorado e controlado por um processador.

- O espelho telescópio Ritchey-Chretien:

Focaliza e concentra a energia no módulo corretor de amostragem de linhas.

- Espelho de correção de linha de varredura

É formado por um par de espelhos para compensar o movimento do satélite pela órbita enquanto ele está realizando a varredura linear.

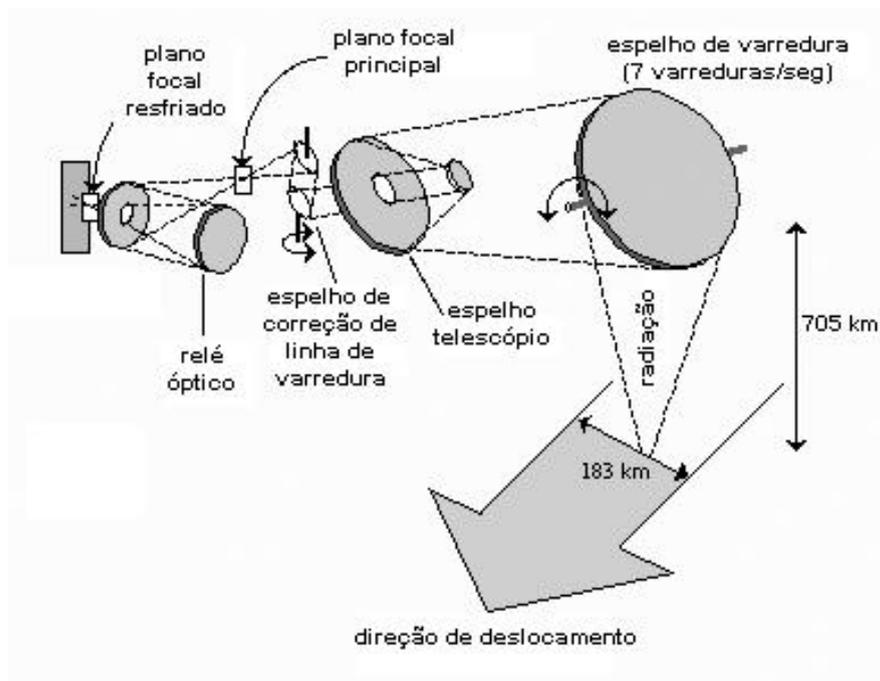


FIGURA 4.4 - Componentes do Sensor ETM+.
 FONTE: Moreira (2001).

- Plano focal principal

A energia procedente diretamente do corretor de amostragem de linhas é focalizada sobre o plano focal principal. Este plano serve para detectar a radiação dentro das bandas espectrais 1 até a 4 e a banda 8. O plano focal possui submódulos: uma matriz de detectores na superfície do plano focal e duas baterias de amplificadores. A matriz do plano focal é formada por 5 matrizes de detectores: para as bandas 1 até a 4 e para a banda 8 (banda pancromática). As matrizes das bandas 1 até a banda 4 são formadas por 16 detectores. A matriz da banda 8 é formada por 32 detectores. Portanto, a banda 8 possui o dobro da resolução espacial que as outras bandas. Os pré-amplificadores dos detectores se encontram montados no plano focal em

duas baterias. Sobre cada bateria se encontra uma torre de esfriamento para dissipar o calor dos pré-amplificadores.

- Relé Óptico

O relé óptico consiste em uma estrutura que contém um espelho com dobraduras e um espelho esférico, os quais são usados para enviar a imagem procedente (refletida) do plano focal principal para os detectores das bandas 5, 6 e 7 no plano focal frio.

- Plano focal resfriado

O módulo do plano focal está montado sobre o estágio frio de um módulo de refrigeração que opera a uma temperatura nominal de aproximadamente 90 graus kelvin. O módulo deste plano focal contém matrizes de detectores para as bandas 5, 6 e 7; cada banda se situa em uma matriz separada. As matrizes para as bandas 5 e 7 contém 16 detectores cada. A resolução espacial para estas bandas é a mesma das bandas de 1 a 4. A matriz para a banda 6 contém 8 detectores.

- Módulo de refrigeração

Possui a função de dissipar o calor do plano focal frio. É estruturado por várias partes: um estágio frio, um estágio intermediário, um módulo de irradiação e uma porta que tem uma função dupla: evitar que entre pelo refrigerador a radiação refletida da Terra e para controlar a direção de dissipação da radiação.

- Filtros espectrais

As bandas espectrais para o sensor ETM+ são determinadas através de uma resposta combinada de todo o conjunto de elementos ópticos (corretor de amostragem de linhas, o plano focal principal, o plano focal secundário, etc), por filtros espectrais e pelos detectores individualmente. Entretanto, os filtros espectrais que se encontram diante de cada matriz de detectores, são os que predominam no estabelecimento das bandas ópticas para cada banda

espectral. Os filtros situados no plano focal primário são para as bandas 1 a 4 e a banda 8 (pancromática). Os filtros situados no plano focal frio são para as bandas 5 a 7.

O padrão de amostragem do pixel do ETM+ é regular e simétrico. As frequências de amostragem (u_a) são equivalentes nas direções x e y, e iguais a $33,34 \times 10^{-3}$ ciclos/m para as bandas de 1 a 5 e 7 e $66,67 \times 10^{-3}$ ciclos/m para a banda pancromática. Desta forma os pixels são caracterizados em uma grade que é quase quadrada dentro de cada varredura. A resposta do espalhamento linear do sistema ótico, detectores e da eletrônica (componentes do sistema sensor) não é exatamente igual nas direções de varredura do espelho e de trajetória do satélite. Existem razões para isto:

- O efeito do filtro eletrônico passa-baixas que é aplicado à saída de cada detector produz uma largura maior na função de espalhamento ao longo da trajetória do que ao longo da varredura do espelho para todas as bandas, com exceção da banda pancromática.
- O desempenho óptico é melhor ao longo da trajetória do satélite do que na varredura do espelho.
- Os detectores não são quadrados para todas as bandas. Os detectores da banda pancromática e os detectores das bandas 5 e 7 são retangulares, sendo ligeiramente mais estreitos no sentido da trajetória do satélite do que na varredura do espelho.

4.2 Descrição e Degradações dos Principais Subsistemas do Sensor

Como premissa para o estudo do problema de restauração de imagens, é necessário que se compreenda o funcionamento e a degradação provocada pelo sistema sensor na imagem gerada.

Do ponto de vista de processamento de sinais, o sensor pode ser dividido em subsistemas, sendo eles: sistema ótico, detectores, filtro eletrônico, sistema de amostragem, quantização e codificação. Cada um destes subsistemas

apresenta particularidades que serão descritas a seguir. A Figura 4.5 apresenta um diagrama de blocos que mostra os subsistemas que compõem o sistema imageador completo.

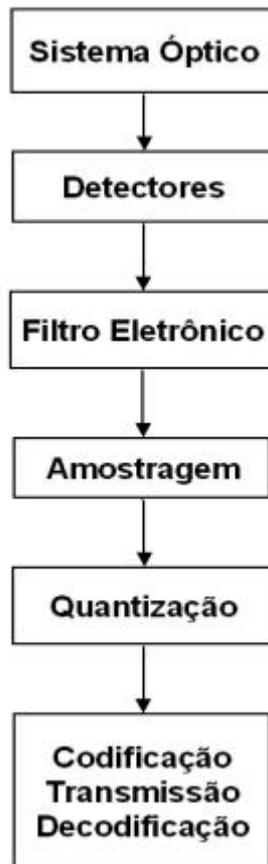


FIGURA 4.5 - Diagrama de blocos do sistema imageador eletromecânico.

Sistema Óptico

O sistema óptico é o responsável pela formação da imagem óptica no plano focal.

Sua contribuição na degradação ocorre devido aos movimentos da câmara causados por distúrbios externos (vibrações) e imperfeições no espelho de

varredura. Esta degradação provoca um efeito de filtro passa-baixas nas duas direções.

Detectores

Os detectores são dispositivos sensíveis à radiação eletromagnética, os quais, quando expostos à mesma, têm suas propriedades elétricas alteradas, de forma mensurável e proporcional à variação do fluxo de radiação (Oliveira, 1975). A radiação chega ao detector através de um sistema ótico, que faz com que esta seja direcionada ao plano focal deste dispositivo.

Ruídos podem surgir no próprio detector, na energia radiante a qual este responde, ou no sistema eletrônico que o acompanha. Um projeto eletrônico cuidadoso inclui uma preocupação com a baixa amplificação do ruído, pois isto reduz o ruído final do sistema. Para melhorar o sistema de detecção, é interessante reduzir o ruído interno a um nível que somente a componente ruidosa que surge da energia radiante que incide no detector, possa ser detectado.

Outras degradações que podem surgir são causadas pelas variações nas respostas dos detectores e também pelo próprio tamanho do detector. Os detectores são os responsáveis diretos pelas propriedades geométricas dos pixels na imagem digital, que é a projeção geométrica dos mesmos na superfície terrestre. Esta projeção define a resolução espacial nominal do sistema.

Filtro eletrônico

O filtro atua como limitador de freqüências, minimizando o efeito de sobreposição de espectros (*aliasing*) que ocorre no processo de amostragem. Por não ser ideal, este filtro não limita, com precisão, o sinal, o que acarreta uma pequena distorção do mesmo. Esta distorção geralmente é menos perceptível do que o efeito de sobreposição de espectros se a freqüência de corte for convenientemente escolhida. Este efeito pode ser facilmente observado em objetos lineares (ruas, aeroportos, etc) nas imagens. O efeito é

como uma “lâmina” de uma serra. A Figura 4.6 ilustra o efeito de serrilhamento em uma imagem, indicado pela seta.

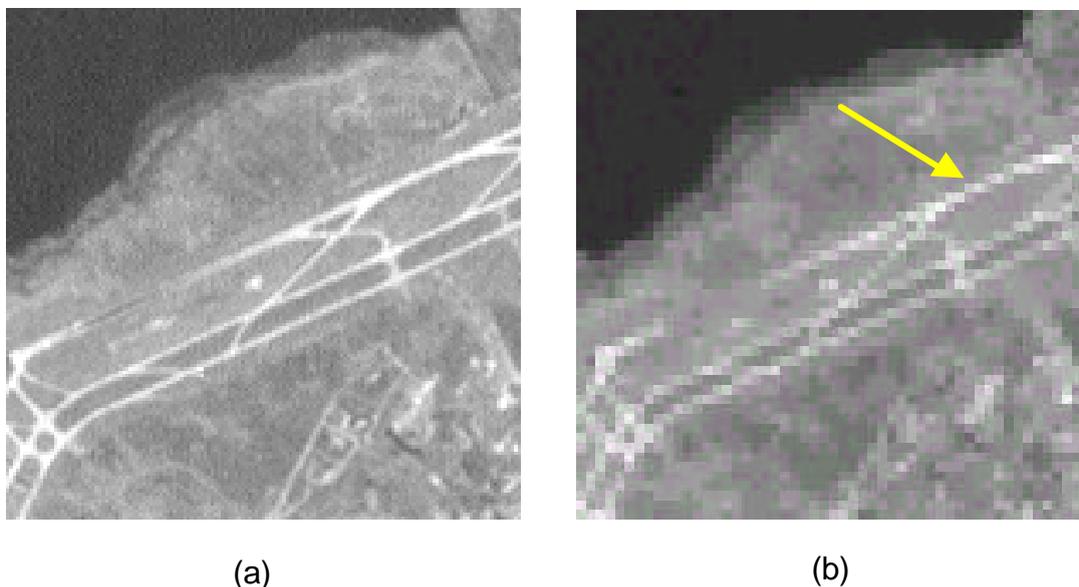


FIGURA 4.6 - O efeito de aliasing.(a) Imagem original; (b) Efeito de aliasing na imagem.

Amostragem

A amostragem é o processo que transforma um sinal contínuo em um conjunto de amostras. No caso de sensores eletromecânicos como o ETM+, a amostragem é realizada na direção da varredura do espelho. Na direção da trajetória do satélite o dado já é amostrado naturalmente pela abertura do detector.

Alguns fatores de degradação são inseridos neste estágio:

a) Deslocamento da Imagem

O processo de amostragem é realizado em função de um determinado intervalo de tempo. Neste intervalo de tempo, a imagem é deslocada causando um efeito de borramento da imagem. Portanto, o sinal amostrado é uma média do sinal visto durante o intervalo de tempo de amostragem.

b) Sub-Amostragem

A Figura 4.7 representa, graficamente, o processo de amostragem, para um sinal unidimensional, no domínio do tempo (esquerda) e da frequência (direita). O processo de amostragem ideal de uma função, no domínio do tempo, pode ser representado pela multiplicação dessa função por um “trem de impulsos” separados pela taxa de amostragem (Δx). Em 4.7a estão representados o sinal original, à esquerda, e a sua transformada de Fourier à direita. Um trem de impulsos é utilizado para amostrar o sinal (Figura 4.7b). A amostragem é realizada multiplicando-se (4.7a) por (4.7b) gerando um conjunto de amostras espaçadas de Δx , como mostram as Figuras (4.7c) e (4.7d). No domínio da frequência, a operação de amostragem é dada pela convolução da transformada de Fourier do trem de impulsos (Figura 4.7b) pela transformada de Fourier da função. O resultado é a repetição do espectro da função centralizadas nas frequências múltiplas da frequência de amostragem ($1/\Delta x$). Se a amostragem for suficientemente fina (Δx pequeno), essa repetição não vai implicar na sobreposição dos espectros no domínio da frequência, como mostra a Figura 4.7d. A Figura 4.7c ilustra a situação em que a amostragem não é suficientemente fina; neste caso ocorre a sobreposição dos espectros que rebate as componentes em altas frequências dentro da faixa das baixas frequências dando origem ao efeito de “*aliasing*” (Figura 4.7c).

Quantização

O efeito de quantização é dado pela impossibilidade de se medir um intervalo infinito de valores de intensidade dos pixels. Portanto, o processo de quantização, é a codificação dos valores contínuos de um sinal em intervalos discretos, o que equivale a um efeito de arredondamento. O número de bits por pixel corresponde ao número de tons de cinza que podem ser representados na imagem digital. A incerteza de quantização é inerente ao conversor Analógico/Digital e, portanto, não tem como ser reduzida ou eliminada.

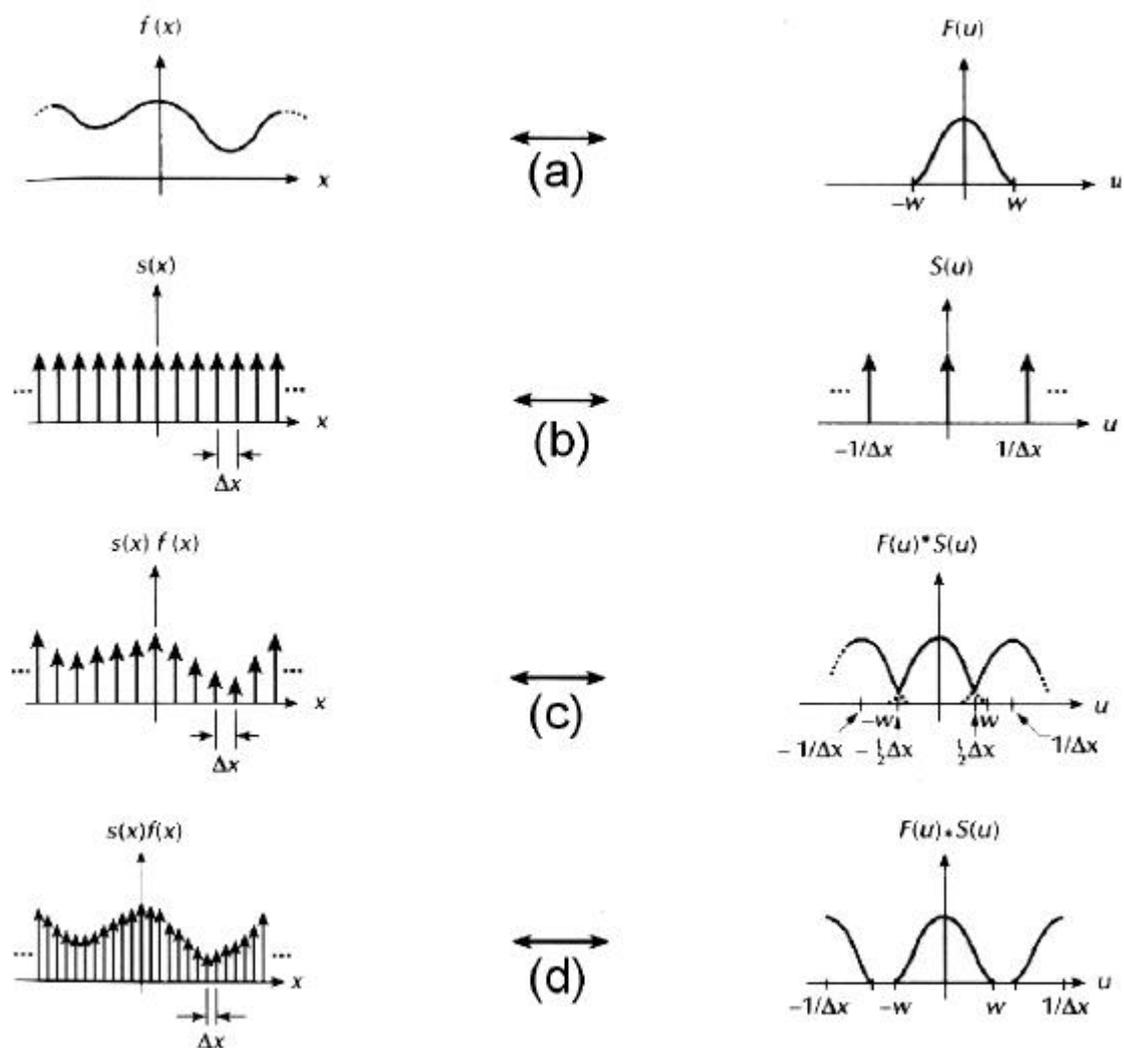


FIGURA 4.7 - Ilustração gráfica do conceito de amostragem.
 FONTE: Adaptada de Gonzalez & Woods (2000).

Codificação

O sinal é codificado e transmitido para a estação terrena. Neste processo, um ruído do próprio canal de transmissão que é a atmosfera e do próprio receptor pode ser inserido. O sinal recebido é, então, codificado.

4.3 Modelo dos Sistemas Imageadores

Para o projeto de um filtro de restauração de imagem é necessário caracterizar os efeitos da degradação do sistema físico que gera a imagem digital. O procedimento consiste em modelar os efeitos da degradação da imagem e então executar a operação inversa para obter uma imagem restaurada. Deve-se enfatizar que, a obtenção de um modelo preciso dos efeitos de degradação da imagem é a chave para uma eficaz restauração da imagem.

A FTM de um sensor, que modela os efeitos de degradação, pode ser determinada de várias formas: (1) através de medições realizadas em laboratório antes do lançamento, (2) através de medidas extraídas a partir de uma imagem degradada (depois do lançamento do satélite) e (3) comparando imagens de satélites com imagens adquiridas simultaneamente com uma resolução espacial melhor. No primeiro caso, as medidas são realizadas em laboratório, através da aquisição de valores da FTM do sensor ou dos parâmetros de especificação da ótica, filtro eletrônico, detector, etc. No segundo caso, valores de EIFOV podem ser obtidos através de alvos simulados (artificiais) no terreno, que apresentam alto contraste em relação ao fundo, ou a partir de alvos naturais que apresentam uma estrutura bem conhecida tais como pontes, pistas de aeroportos, estradas, etc. No terceiro caso, um filtro passa-baixas é projetado de tal forma que a imagem de melhor resolução processada por este filtro tenha resolução espacial similar à imagem de baixa resolução. A comparação é realizada visualmente, e os parâmetros do filtro são usados para caracterizar a resposta do sensor.

A função de transferência dos sensores a bordo de satélites tem sido objeto de estudos de vários pesquisadores. Carnahan e Zhou (1986) e Schowengerdt et al. (1985) estimam a Função de Espalhamento Pontual (FEP) de algumas bandas do TM-5 (*Thematic Mapper* do satélite Landsat-5) através da análise de objetos na imagem com formatos bem definidos tais como pontes, ruas, aeroportos e bordas. Segundo Storey (2001) a estimação da FTM de sensores de recursos terrestres pode ser realizada de duas maneiras: (1) localizando bordas naturais ou feições lineares que podem ser usadas como observações da resposta linear do sistema ou (2) comparando a imagem do sensor estudado com dados simulados a partir de imagens adquiridas por sensores de melhor resolução. A limitação do primeiro método é a dificuldade de localizar objetos lineares de tamanho suficiente para prover uma representação boa da resposta do sistema. O segundo método tem mais eficiência se os dois conjuntos de imagens forem adquiridos ao mesmo tempo, ou pelo menos sob condições de aquisição semelhantes, evitando os problemas associados com a variação temporal.

O modelo da função de transferência do sistema adotado para o ETM+ é similar ao proposto por Markham (1985) na análise da resposta espacial do TM-5. Este modelo é composto, basicamente, por três componentes: sistema óptico modelado como um borramento gaussiano; o detector modelado como um pulso retangular; e um filtro eletrônico passa-baixas que reduz o efeito de sobreposição de espectros no processo de amostragem. A Figura 4.8 representa o subsistema imageador em forma de diagrama de blocos.

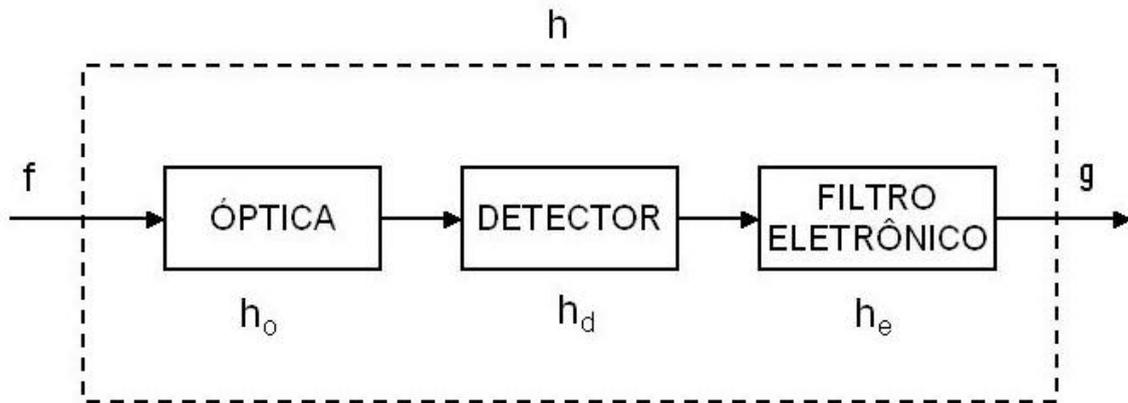


FIGURA 4.8 - Subsistema imageador ETM+.

A resposta impulsiva do sistema é descrita pela convolução das respostas dos três componentes:

$$h = h_o * h_d * h_e, \quad (4.1)$$

onde h_o, h_d, h_e são as respostas impulsivas dos sistemas óptico, detector e filtro eletrônico, respectivamente.

No domínio da frequência a equação (4.1) é dada por:

$$H = H_o \cdot H_d \cdot H_e, \quad (4.2)$$

onde H_o, H_d e H_e são as transformadas de Fourier de h_o, h_d e h_e , respectivamente.

Vale mencionar que a resposta do filtro eletrônico não tem, praticamente, nenhum efeito na direção de trajetória do satélite. Isto se deve ao fato de que a velocidade de varredura nesta direção é muito menor do que a velocidade de varredura do espelho. Ou seja, a frequência espacial correspondente à frequência de corte do filtro, na direção de varredura do espelho, é muito grande. Dessa forma, a resposta do sensor na direção de trajetória do satélite é função apenas da óptica e do detector.

A seguir será apresentado o modelo de cada componente do subsistema sensor que tem sido utilizado em alguns trabalhos (Markham, 1985; Fonseca, 1988; Storey, 2001).

Óptica

A resposta impulsiva do sistema óptico pode ser aproximada por uma distribuição gaussiana da forma:

$$h_o(x) = \frac{1}{(2p)^{1/2} \cdot s} \exp(-x^2/2s^2), \quad (4.3)$$

e a sua FTM, H_o , associada é:

$$H_o(u) = \exp(-2p^2s^2u^2). \quad (4.4)$$

Detector

O detector pode ser modelado por uma função retangular nas duas direções x e y, a saber:

$$h_d(x) = \begin{cases} 1 & -d/2 \leq x \leq d/2 \\ 0 & \text{fora,} \end{cases} \quad (4.5)$$

e a sua transformada de Fourier, H_d , associada é:

$$H_d(u) = \text{sinc}(du), \quad (4.6)$$

onde d é o tamanho da projeção geométrica do detector no solo e

$$\text{sinc}(du) = \frac{\text{sen}(pdu)}{pdu}.$$

Filtro Eletrônico

O sistema ETM+ utiliza um filtro do tipo Goldbert de 4 pólos (dois reais e dois imaginários).

$$H_e(u) = \frac{1}{\left(1 + j\frac{f}{f_1}\right) + \left(1 + 2Lj\frac{f}{f_2} - \left(\frac{f}{f_2}\right)^2\right) \left(1 + j\frac{f}{f_3}\right)}, \quad (4.7)$$

onde $f = u/2p$; f_1 e f_3 são pólos reais; f_2 é o pólo imaginário e L é o parâmetro de amortecimento (*damping*).

Embora o filtro eletrônico do ETM+ tenha sido projetado como um filtro passa-baixas de 3 pólos, testes de pré-lançamento indicaram que o sistema é mais bem caracterizado por um modelo de 4 pólos similar ao modelo do TM-5 (Storey, 2001).

4.4 Função de Transferência do Sensor ETM+

Neste trabalho, a determinação da função de transferência do ETM+ é realizada de duas formas. Primeiro, a FTM do sensor é aproximada por uma função gaussiana utilizando as especificações de projeto (pré-lançamento) do sensor ETM+ para o cálculo do parâmetro EIFOV. No segundo caso, a FTM do sistema é determinada a partir de parâmetros do modelo do ETM+ fornecidos por Storey (2003). Storey (2001) utiliza um modelo teórico do sensor e parâmetros estimados após o lançamento do Landsat-7 para modelar a FTM do ETM+.

4.4.1 Aproximação da Função de Transferência por um Modelo Gaussiano

A teoria de filtro linear possui um teorema análogo ao teorema do limite central da estatística: o produto de N funções de transferências e de bandas limitadas tende a um formato gaussiano quando N é, relativamente, grande.

Normalmente, os sistemas imageadores têm pelo menos quatro funções de transferências, e geralmente uma dessas tem formato gaussiano, como, por exemplo, o sistema óptico. Portanto, a FTM pode ser aproximada por uma função gaussiana,

$$H(u) = \exp(-2p^2 s^2 u^2), \quad (4.8)$$

onde s é o desvio padrão.

A FTM do sistema ETM+ pode ser aproximada por um modelo gaussiano separável, nas duas direções (ao longo da varredura do espelho e ao longo da trajetória do satélite):

$$H(u) = \exp(-ku^2), \quad (4.9)$$

onde u é a frequência normalizada em relação à frequência de amostragem u_a , do sistema. O parâmetro k é uma função da resolução efetiva do sistema (EIFOV) (Fonseca, 1988):

$$k = 4 \cdot \ln(2) \cdot u_a^2 \cdot \text{EIFOV}^2. \quad (4.10)$$

Conhecido os valores de EIFOV, a FTM do sensor é completamente caracterizada. O procedimento utilizado para calcular este parâmetro é esquematizado na Figura 4.9, na forma de diagrama de blocos.



FIGURA 4.9 - Metodologia para a determinação da FTM por um modelo gaussiano.

Valores da FTM em determinadas frequências podem ser obtidos no manual de especificações do Sistema *Landsat-7*, revisto em 1996 pela agência *Goddard Space Flight Center (GSFC)*, e são apresentados na Tabela 4.2. Os valores da FTM são adquiridos para três valores de frequências. Os valores de frequências 0,25; 0,33 e 0,5 correspondem às frequências normalizadas em relação à frequência de amostragem do sistema.

TABELA 4.2 - Especificação da FTM pra o ETM+.

FREQÜÊNCIA	0,25	0,33	0,5
Bandas 1 a 5 e 7			
FTM	0,692	0,551	0,275
Banda Pan			
FTM	0,692	0,551	0,275

Estes valores especificam os valores mínimos da FTM que o sistema, após o lançamento, deve ter para que as imagens atendam aos critérios de qualidade especificados no projeto.

De acordo com Storey (2001), os testes de pré-lançamento indicaram que uma ligeira alteração nas propriedades focais do sistema óptico do ETM+ deveria ser esperada quando o sensor estivesse em órbita. Isto aconteceria devido a uma pequena quantidade de umidade residual presente na saída da estrutura do telescópio do ETM+. A não compensação deste efeito resultaria em uma pequena desfocalização que seria mais visível no plano focal principal (bandas 1 a 4 e a banda pancromática). Para resolver este problema, um “calço” foi projetado para ajustar a entrada de energia no plano focal principal com a intenção de melhorar o foco. Esta solução resultaria em uma melhoria do desempenho da FTM do sensor em órbita.

Infelizmente, o “calço” foi instalado indevidamente e os benefícios que viriam com este ajuste não foram efetivados. Este erro foi detectado, demasiadamente, tarde para que fosse feita uma ação corretiva. Para avaliar o nível de degradação que o sensor sofreria após o lançamento, foi desenvolvido um modelo que previu uma ligeira degradação da FTM do sensor em órbita ao longo do tempo, principalmente na banda pancromática. A banda pancromática é mais sensível aos efeitos ópticos, porque seus detectores têm tamanho menor. As previsões do modelo indicaram que a banda pancromática

apresentaria um valor de FTM abaixo do limite da especificação (0,275). Portanto, os valores das FTM nas frequências indicadas foram alterados, como mostra a Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Nova Especificação da FTM para o ETM+.

FREQÜÊNCIA	0,25	0,33	0,5
Bandas 1 a 5 e 7			
FTM	0,692	0,551	0,275
Banda Pan			
FTM	0,627	0,461	0,170

Utilizando os dados de especificação, a função gaussiana foi ajustada com os três pontos disponíveis (FTM x frequência normalizada). Para o ajuste da curva gaussiana foi usado o programa DATAFIT 8.0 disponível na internet no endereço eletrônico <http://www.curvefitting.com> (DATAFIT, 2002), e os resultados são apresentados abaixo e nas Figuras 4.10 e 4.11. A função gaussiana é simétrica em relação ao eixo vertical. As frequências negativas que aparecem no gráfico são apenas ilustrativas já que as frequências são sempre positivas.

Bandas de 1 a 5 e 7:

$$H(u) = 0.982613 * \exp\left(\frac{-(u)^2}{2 * (0.307932)^2}\right). \quad (4.11)$$

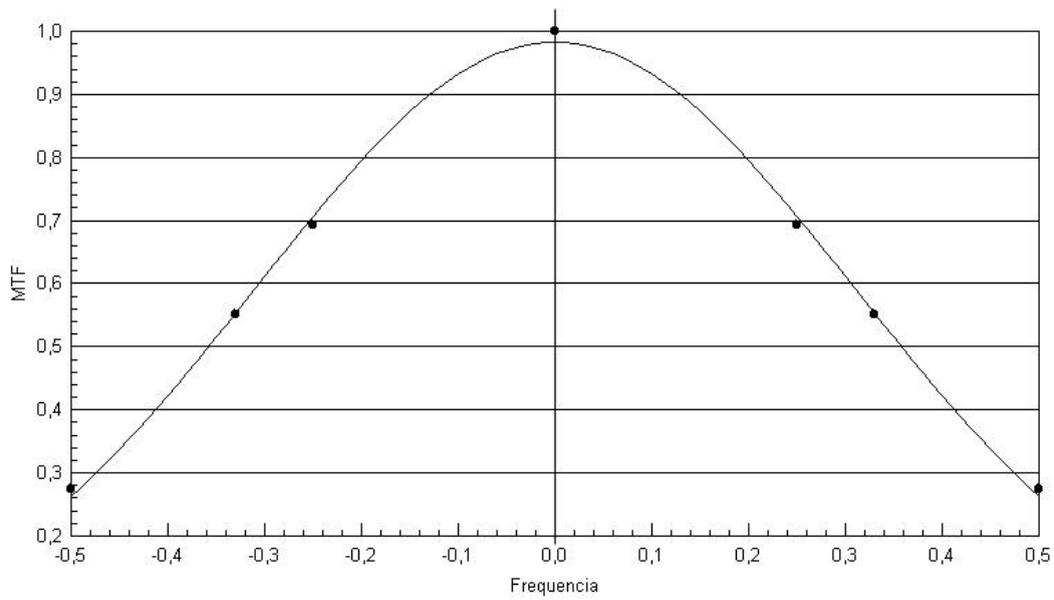


FIGURA 4.10 - FTM das Bandas de 1 a 5 e 7.

Banda pancromática:

$$H(u) = 0.993685 * \exp\left(\frac{-(u)^2}{2 * (0.264615)^2}\right). \quad (4.12)$$

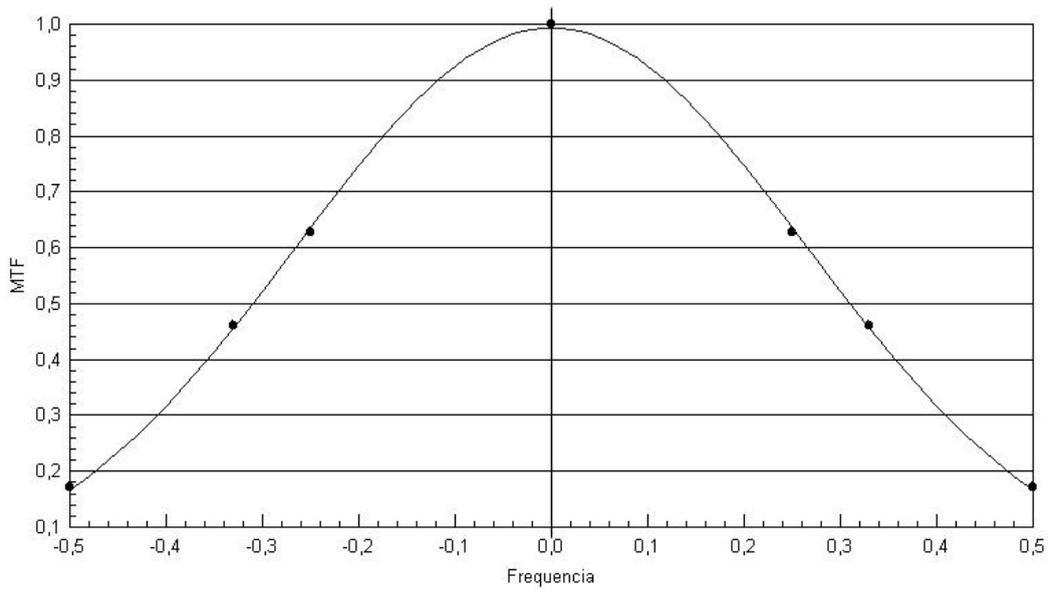


FIGURA 4.11 - FTM da banda pancromática.

A partir da FTM do sensor estimada, o valor da frequência (u_w) para a qual a FTM é igual a 0.5 é calculada. De acordo com a Equação 2.1 os valores de EIFOVs são calculados, e através da Equação 4.10 o parâmetro k é facilmente encontrado.

Os parâmetros u_w , k e EIFOV obtidos, para cada banda do ETM+, são apresentados na Tabela 4.4. O parâmetro EIFOV foi calculado apenas na direção de varredura pois não foram fornecidos dados para a direção da trajetória. Portanto, foram assumidos os mesmos valores de EIFOV em ambas direções (trajetória do satélite e varredura do espelho).

TABELA 4.4 – Valores de u_w , k_x e EIFOV para o ETM+.

Bandas	u_w	Parâmetro k_x	EIFOV
Bandas 1 a 5 e 7	0,357	5,40	41,90
PAN	0,310	7,20	24,18

4.4.2 Estimação da Função de Transferência por um Modelo Teórico Apoiado em Dados Levantados Experimentalmente

Após o lançamento, a FTM do ETM+ foi medida periodicamente com o objetivo de avaliar a degradação da resposta do sensor ao longo do tempo.

Storey (2001) estimou a FTM do sensor ETM+ utilizando um ajuste entre um modelo teórico e um modelo experimental a partir da caracterização de um alvo natural. A caracterização da FTM do ETM+ é realizada através da análise de imagens, livres de nuvem, de uma ponte de duas vias do Lago Pontchartrain em Louisiana, EUA alinhada aproximadamente com a trajetória do Landsat-7 (Figura 4.12).

As dimensões da ponte são tais que as vias da ponte são bem visíveis nas imagens da banda pancromática (15 metros) (Figura 4.13), o que não ocorre nas bandas de 30 metros, que identificam as duas vias como sendo um único alvo (linha). Embora tenham a mesma largura, as duas vias da ponte foram construídas em épocas diferentes (1956 e 1969) e apresentam uma reflectância ligeiramente diferente.



FIGURA 4.12 - Área do Lago Pontchartrain em Louisiana, EUA. Landsat-7. Composição colorida 3B4G5R.
FONTE: Storey (2001).

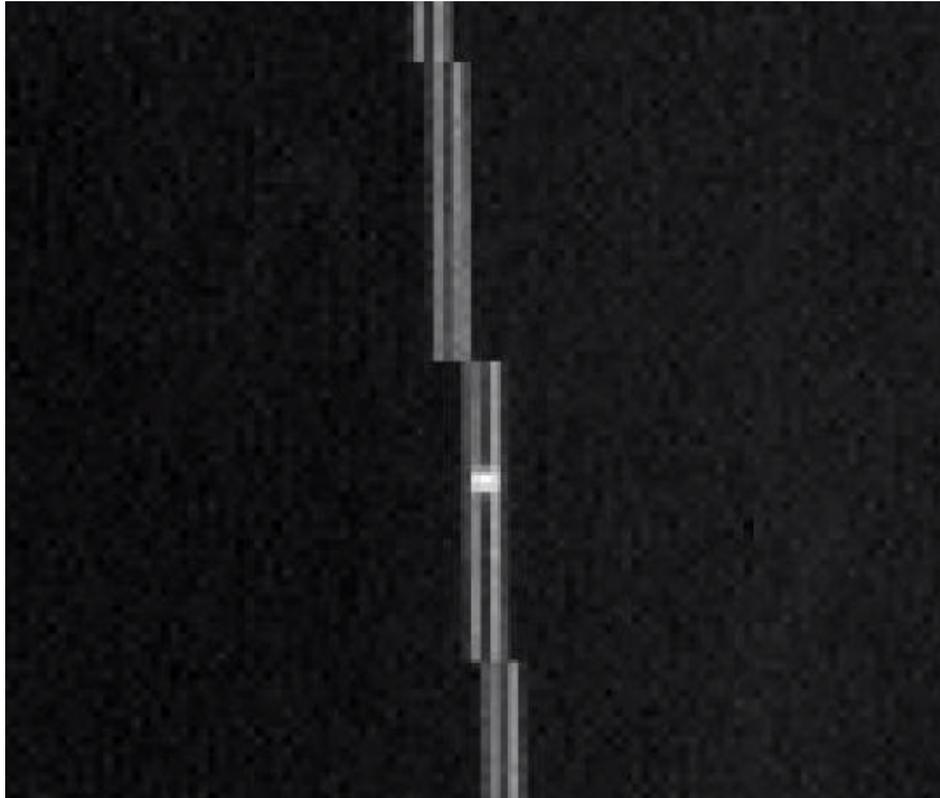


FIGURA 4.13 - Ponte sobre Lago Pontchartrain em Louisiana, EUA. Landsat-7. Banda Pancromática.
FONTE: Storey (2001).

Uma descrição resumida da metodologia para a avaliação da FTM do sensor ETM+, proposta por Storey (2001) é apresentada nesta seção.

A ponte (alvo) é modelada como um pulso retangular, no domínio da frequência, sobre um fundo de amplitude constante R . A FTM do sensor é modelada, no domínio da frequência, usando o modelo de Markham (1985), como mencionado na seção 4.3, H , que possui vários parâmetros a serem determinados tais como, os pólos do filtro (f_1 , f_2 , f_3), tamanho do detector (d), borramento da ótica (σ), que no modelo usado somam 6.

O modelo do alvo (ponte) e os modelos da função de transferência usam um total de 12 parâmetros, dos quais, quatro são fixos, como é mostrado na Tabela 4.5:

TABELA 4.5 - Parâmetros do modelo de estimação da FTM.

Modelo	Parâmetro	Valor inicial	Tipo	Fonte
Ponte	Largura da Parte Oeste	10,0 metros	fixo	Louisiana DOT
Ponte	Radiância da Parte Oeste	Dependente da banda	variável	Imagem L1R
Ponte	Radiância da Água	Dependente da banda	variável	Imagem L1R
Ponte	Distância entre as extensões	24,4 metros	fixo	Web Site do Lago Pontchartrain
Ponte	Largura da Parte Leste	10,0 metros	fixo	Louisiana DOT
Ponte	Radiância da Parte Oeste	Dependente da banda	variável	Imagem L1R
FTM	Sigma Gaussiano (σ)	11,3 μ rad	variável	Análise do TM por Markham
FTM	Tamanho do detector (d)	42,5/21,25 μ rad	fixo	Projeto do ETM+
FTM	f1	10407,5 ciclos/rad	variável	Análise do TM por Markham
FTM	f2	12556,9 ciclos/rad	variável	Análise do TM por Markham
FTM	f3	221725 ciclos/rad	variável	Análise do TM por Markham
FTM	Coeficiente Damping (L)	0,425	variável	Análise do TM por Markham

A transformada inversa de Fourier do produto das funções de transferência R e H, caracteriza a resposta do sensor para o alvo de estudo. Tomando-se o perfil radiométrico superamostrado da ponte na direção de varredura e ajustando os dados amostrados com a resposta do sensor através dos mínimos quadrados, pode-se estimar os parâmetros do modelo da FTM do sensor. A Figura 4.14 mostra o ajuste do modelo para a banda 4 do ETM+ realizado por Storey (2001).

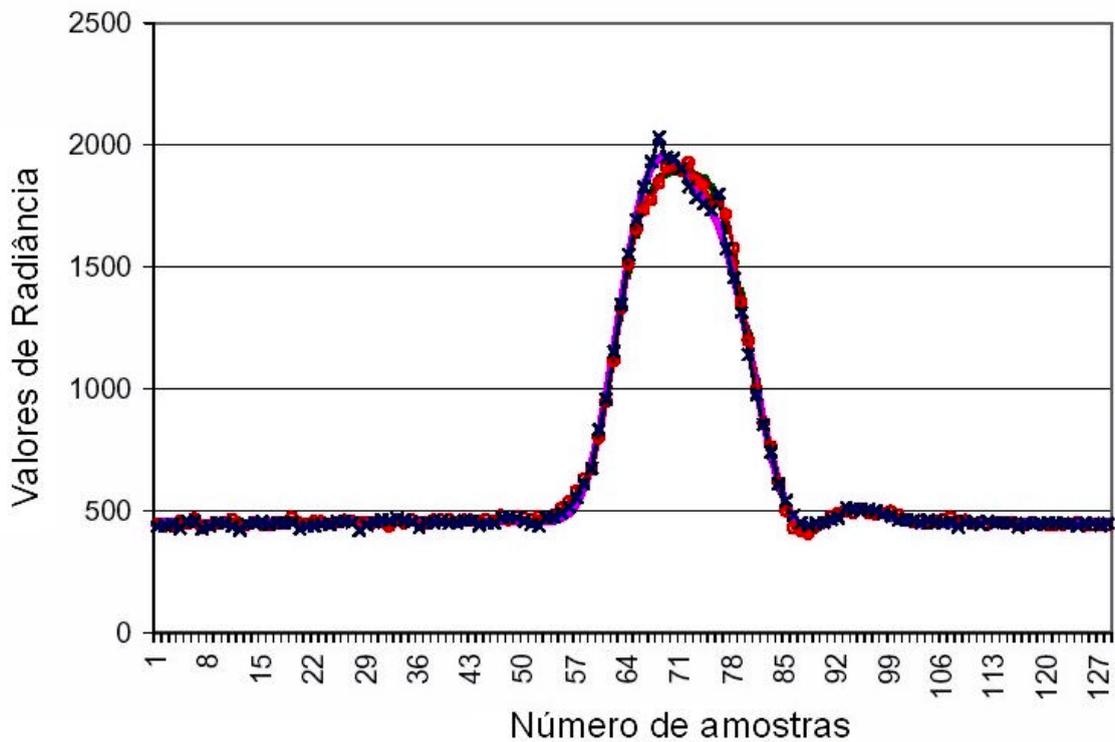


FIGURA 4.14 - Modelo de ajuste para a banda 4.
 FONTE: Storey (2001).

O melhor ajuste da função de transferência é então analisado para determinar a frequência de *Nyquist* (metade de frequência de amostragem). Estes valores são, então, usados para avaliar a resolução espacial efetiva do sensor ETM+. A avaliação da FTM, na frequência de *Nyquist*, foi realizada para onze cenas do ETM+, adquiridas entre junho de 1999 e maio de 2001. Os resultados desta avaliação são apresentados na Figura 4.15 para todas as bandas. Além da especificação da FTM em 0,27 (linha contínua preta), o gráfico mostra também a nova especificação prevista para a banda pancromática de 0,17 (linha pontilhada vermelha).

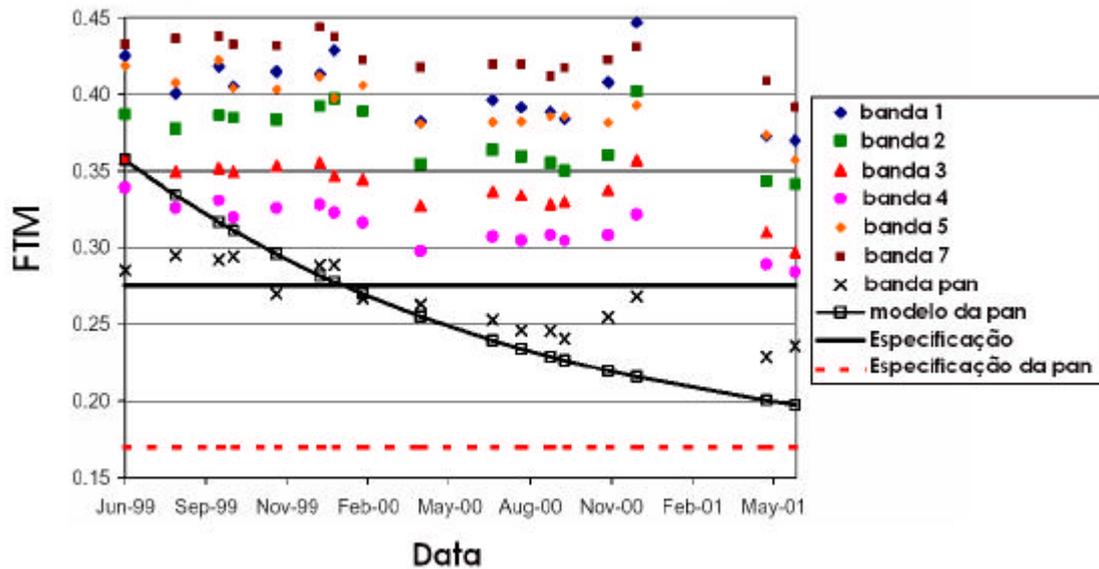


FIGURA 4.15 - FTM na frequência de Nyquist analisada por período. Adaptada de Storey (2001).

Pode-se verificar que, a banda pancromática ficou realmente fora da especificação antiga desde fevereiro de 2000. Considerando esta especificação, os resultados indicam que o desempenho da FTM da banda pancromática é aproximadamente 13% abaixo do valor especificado em 0,275 da frequência de *Nyquist*. Considerando a nova especificação, os valores da FTM para a banda pan estão dentro do limite relaxado (0,17), como previsto no modelo de pré-lançamento.

Para as outras bandas, embora haja uma variação das FTMs para diferentes datas, os resultados mostram uma tendência dos valores de FTMs ficarem dentro do valor especificado.

Os valores da FTM do sensor na direção da trajetória, embora não publicados, foram fornecidos por Storey e são usados neste trabalho.

A Tabela 4.6 apresenta os valores dos parâmetros da FTM, para as bandas do sensor ETM+ (exceto banda 6), nas direções da trajetória do satélite e da varredura do espelho, fornecidos por Storey. Dados mais recentes (03 de junho

de 2002) foram escolhidos para os experimentos realizados neste trabalho, por terem sido adquiridos em data próxima à data das imagens catalogadas para esta pesquisa (Junho e Agosto de 2002).

TABELA 4.6 - Parâmetros do modelo do ETM+.

Bandas	Ao longo da trajetória						Ao longo da varredura	
	Óptica	Detector	Filtro Eletrônico				Óptica	Detector
	Sigma	d	f1	f2	f3	L	Sigma	D
Banda 1	8,0050	29,6931	0,010038	0,0169	0,0313	0,311	7,2843	28,4941
Banda 2	8,4463	29,9752	0,010038	0,0169	0,0313	0,311	8,4367	30,3279
Banda 3	9,3050	29,6226	0,010038	0,0169	0,0313	0,311	8,6420	30,2573
Banda 4	10,2155	29,6931	0,010038	0,0169	0,0313	0,311	9,6061	29,4815
Banda 5	9,2831	28,2120	0,012264	0,0172	0,0389	0,335	9,1463	30,9626
Banda 7	8,1850	28,9878	0,012264	0,0172	0,0389	0,335	6,7694	31,3858
Pan	7,6123	13,7533	0,028215	0,0424	0,0628	0,278	9,52719	15,1639

A Figura 4.16 ilustra o procedimento, de forma esquemática, para a determinação dos valores de EIFOV do ETM+. A FTM de cada componente do sensor é determinada e o EIFOV é calculado em função da FTM resultante obtida através do produto das FTMs dos subsistemas.

A fim de ilustrar, as Figuras 4.17 e 4.18 mostram a FTM de cada componente, óptica, detector filtro eletrônico, e a FTM resultante nas direções de varredura do espelho e trajetória do satélite, respectivamente, para a banda 3, obtidas segundo a Equação 4.2. A FTM da banda pan é apresentada nas Figuras 4.19

e 4.20 para as direções de varredura do espelho e trajetória do satélite, respectivamente.

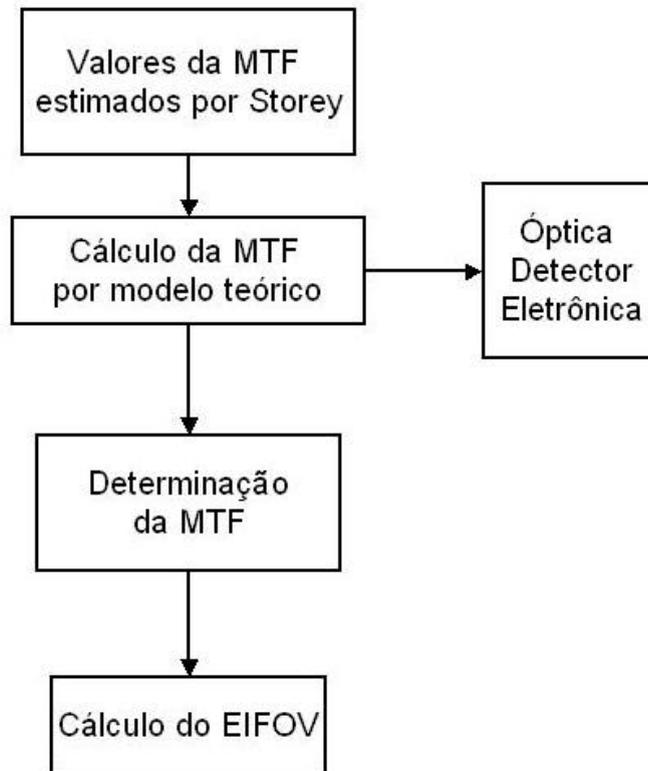


FIGURA 4.16 - Metodologia de determinação da FTM por um modelo teórico.

Pode-se observar uma atenuação maior da resposta do sensor na direção de varredura do espelho (X) devido ao efeito de borramento do filtro passa-baixas. Portanto, o valor de EIFOV determinado, graficamente, nas duas direções é um pouco maior na direção de varredura do espelho; este borramento adicional tende a degradar a resolução espacial do sistema nesta direção.

Em contrapartida, o efeito de sobreposição de espectros é reduzido nesta direção, pois as componentes em altas frequências são atenuadas pelo filtro, o que não ocorre na direção de trajetória do satélite (Y).

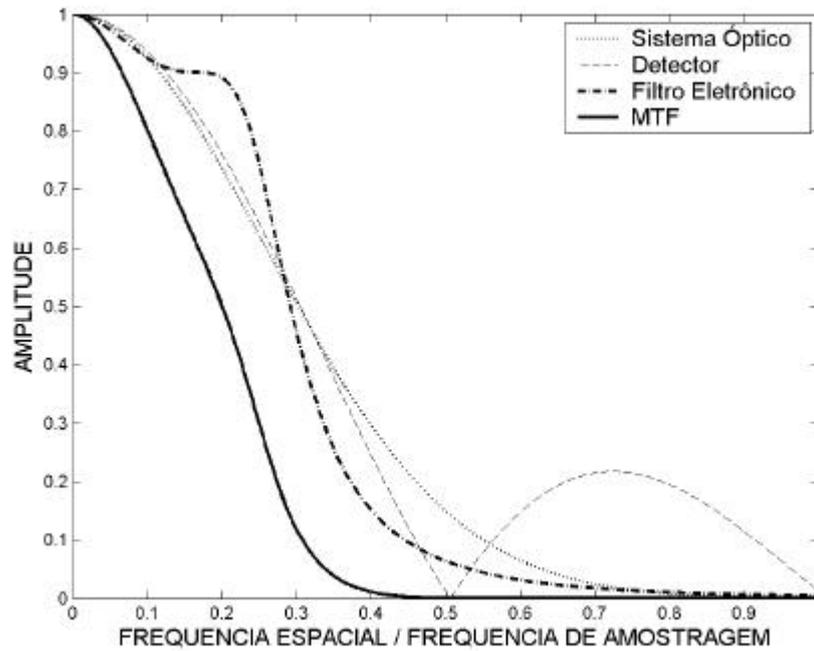


FIGURA 4.17 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da varredura do espelho; banda 3.

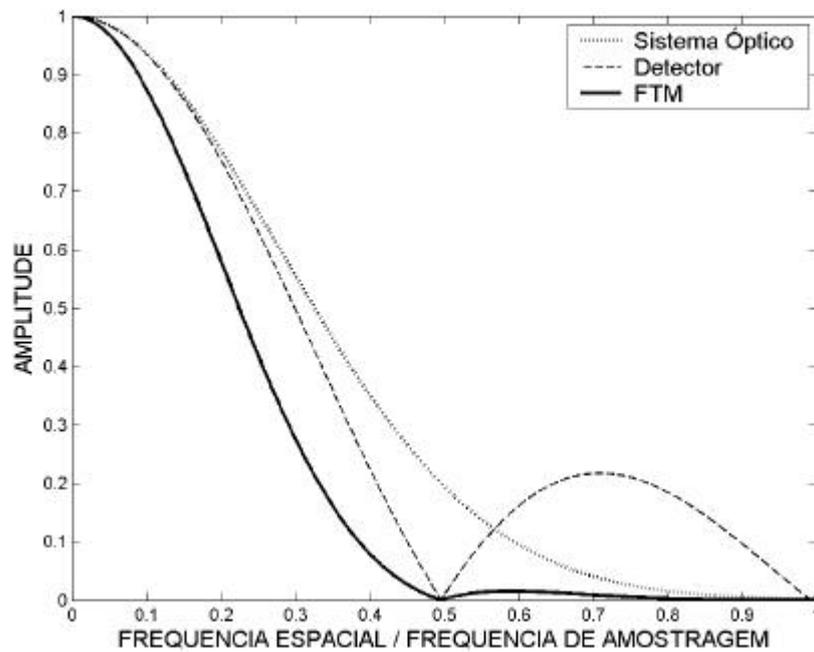


FIGURA 4.18 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da trajetória do satélite; banda 3.

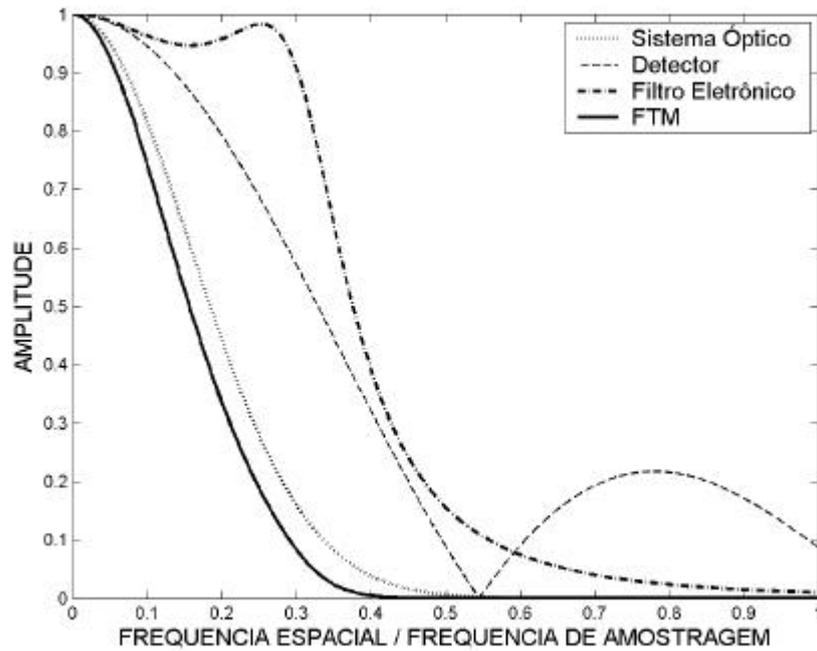


FIGURA 4.19 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da varredura do espelho; banda pancromática.

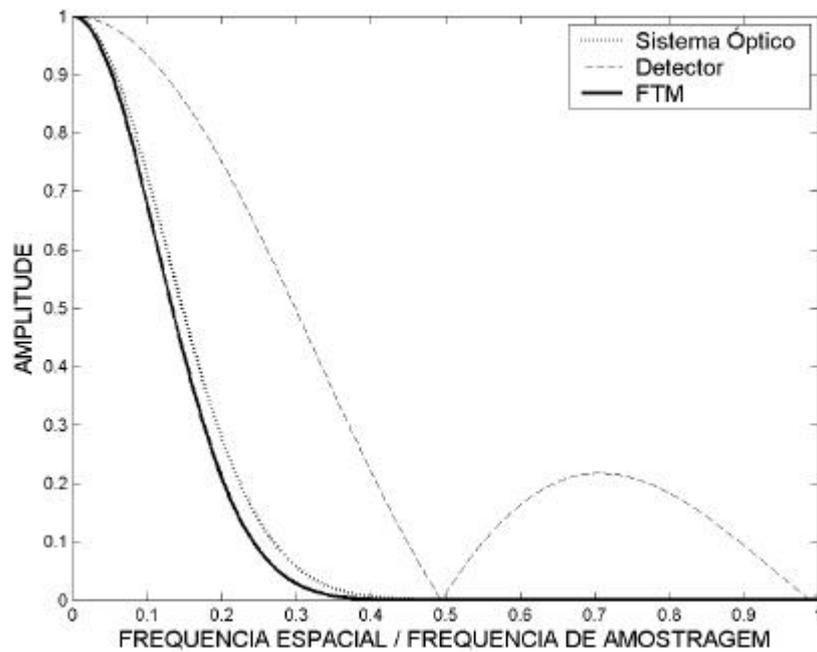


FIGURA 4.20 - FTM dos componentes do sensor ETM+, ao longo da trajetória do satélite; banda pancromática.

Finalmente, a Tabela de 4.7 apresenta os valores do parâmetro k (Equação 4.10) nas direções x e y , e dos EIFOV obtidos através das FTMs.

TABELA 4.7 - Valores de k E EIFOV nas direções x e y para o ETM+ (Valores coletados em 03/06/2002).

Bandas	k_x	k_y	EIFOV(x)	EIFOV(y)
Banda 1	3,85	3,00	35,35	31,25
Banda 2	4,02	3,37	36,15	33,10
Banda 3	4,30	3,44	37,40	33,42
Banda 4	4,72	3,71	39,16	34,74
Banda 5	3,67	3,71	34,56	34,74
Banda 7	3,43	2,98	33,40	31,13
PAN	7,06	9,68	23,94	21,03

Uma alternativa seria calcular os valores de EIFOV utilizando a média dos últimos parâmetros do modelo coletados, evitando assim uma tendência nos resultados já que a análise foi feita apenas em um conjunto de dados de uma só data. Os valores dos parâmetros obtidos pela média são apresentados na Tabela 4.8.

TABELA 4.8 - Valores de k E EIFOV nas direções x e y para o ETM+ (Média dos últimos dados coletados).

Bandas	k_x	k_y	EIFOV(x)	EIFOV(y)
Banda 1	3,41	3,01	33,27	31,30
Banda 2	3,63	3,02	34,32	31,35
Banda 3	3,85	3,50	35,36	33,73
Banda 4	4,24	3,82	37,12	35,22
Banda 5	3,38	3,11	33,14	31,81
Banda 7	3,23	2,96	32,39	31,03
PAN	6,01	7,95	22,09	20,04

Pode-se verificar que os valores não foram alterados de maneira muito significativa, o que valida os dados tomados no dia 03/06/2002 para a estimativa dos valores de EIFOV utilizados no projeto do filtro de restauração. Um outro fator que permite a validação destes dados é o fato que os valores de EIFOV calculados estão dentro da especificação ($EIFOV \leq 38,7$), similar aos resultados obtidos por Storey (2001), como ilustra a Figura 4.21.

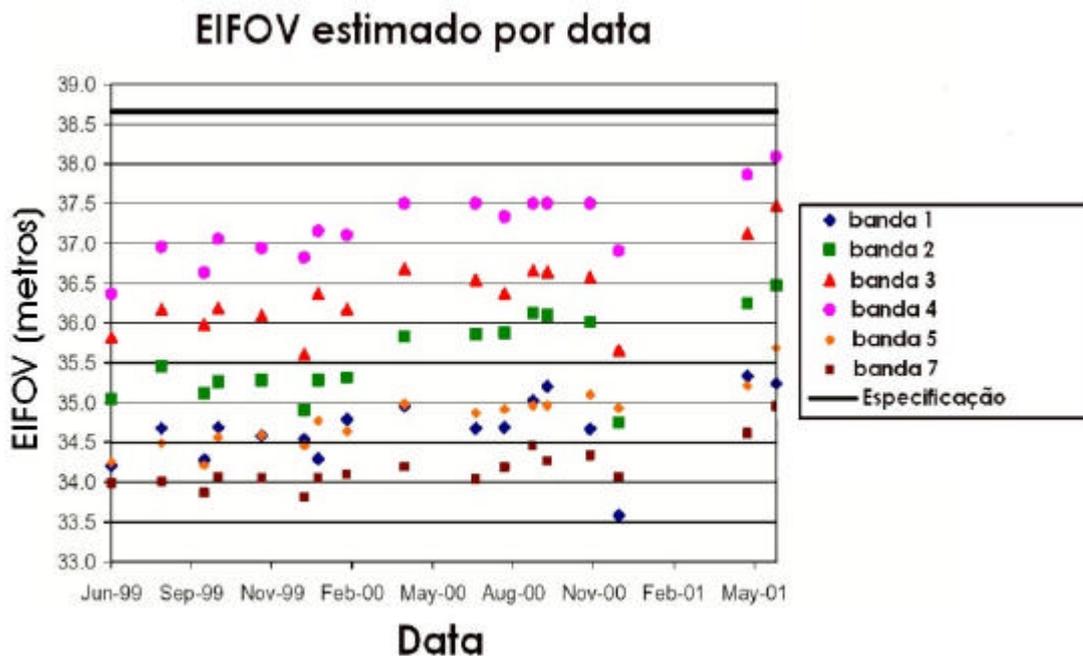


FIGURA 4.21 - EIFOV estimado entre junho de 1999 e maio de 2001.
 FONTE: Adaptada de Storey (2001).

Comparando os valores de EIFOV apresentados na Tabela 4.4 (modelo pré-lançamento) com os valores na Tabela 4.7 (modelo pós-lançamento), pode-se observar que os valores de EIFOV na Tabela 4.4 são maiores do que os valores da tabela 4.7. Na verdade, os valores de EIFOV obtidos no primeiro método (Tabela 4.4) foram calculados usando os valores da FTM no limite, especificado como o pior valor de FTM que o sistema deveria apresentar, além de ter embutido um erro de aproximação da gaussiana. Pode-se dizer que este valor é pessimista. Através dos experimentos após-lançamento, pode-se comprovar que o desempenho das bandas foi satisfatório, dentro do limite especificado.

Portanto, para o projeto do filtro de restauração desenvolvido neste trabalho serão usados os parâmetros definidos na Tabela 4.7.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS PROCESSOS DE RESTAURAÇÃO E INTERPOLAÇÃO DE IMAGENS

Inúmeras técnicas para o realce de imagens têm sido propostas por pesquisadores de diferentes áreas. Métodos como interpolação e restauração de imagens são comumente utilizados para este fim. Este capítulo apresenta a técnica de combinação dos processos de interpolação e restauração que permite melhorar a resolução efetiva de uma imagem degradada sobre uma grade mais fina. Esta técnica tem sido utilizada em várias aplicações na área de sensoriamento remoto com resultados interessantes (Miranda, 2000; Gherardi et al., 2001; Carvalho & Gherardi, 2003; Simi et al., 2003) .

O projeto do filtro de restauração utilizado neste trabalho é baseado no projeto proposto por Fonseca (1988) para restauração de imagens do Landsat-5. Sendo assim, as seções 5.2 e 5.3 apresentam de forma resumida, a teoria envolvida no desenvolvimento deste filtro.

5.1 Interpolação

Em processamento digital de imagens, a técnica que permite estimar valores de amostras de uma imagem em pontos de uma grade desejada, a partir de amostras da grade original, é conhecida por reamostragem. Quando existe a necessidade de estimar valores radiométricos em pontos intermediários situados entre os pontos em que os valores de radiometria são conhecidos, utiliza-se o processo de interpolação. Essa técnica é comumente utilizada nos processos de correção geométrica, registro e ampliação de escala.

Algumas técnicas de interpolação se destacam ou pela sua eficiência computacional ou pelos bons resultados obtidos. Entre estas técnicas podemos citar os métodos de Vizinheiro Mais Próximo, Bilinear e Convolução Cúbica

(Richards, 1993). Como a teoria sobre estes interpoladores está bem estabelecida na literatura, neste trabalho não será dada uma atenção especial a este tópico. Para maiores detalhes ver (Schowengerdt, 1997, Richards, 1993, Mather, 1987). Vale a pena ressaltar que o uso de cada um destes interpoladores depende da aplicação a que se propõe. O interpolador Vizinho Mais Próximo tem sido utilizado em aplicações em que não se deseja alterar as estatísticas dos dados, enquanto o interpolador de Convolução Cúbica (ICC) tem sido usado em aplicações em que se deseja uma aparência mais natural da imagem. E o interpolador Bilinear é mais rápido que o ICC, porém degrada as feições na imagem.

Os efeitos na imagem causados pelos interpoladores mencionados podem ser vistos na Figura 5.1. A formação de blocos em 5.1b, a perda de resolução em 5.1c e a aparência mais “natural” em 5.1d ilustram as alterações sofridas pela imagem original 5.1a.

Embora alterem a imagem significativamente, estes interpoladores são os mais utilizados já que estão implementados na maioria dos sistemas de processamento de imagens.

5.2 Processo Combinado Para Interpolação e Restauração

Se as amostras de um sinal g são geradas obedecendo ao teorema da amostragem pode-se afirmar que o sinal original pode ser reconstruído sem erro a partir de todas as suas amostras. Este processo é ilustrado na Figura 5.2 que mostra a reconstrução no domínio da frequência. As Figuras 5.2a e 5.2b mostram o espectro do sinal g e um “trem de impulsos” com frequência de amostragem u_a . O espectro do sinal amostrado representado na Figura 5.2c, é igual ao espectro do sinal contínuo no intervalo $|u| \leq u_c$. Portanto, para recuperar o sinal g basta que os espectros laterais sejam eliminados por um

Filtro Passa-Baixas (FPB) contínuo H cuja frequência de corte u_{pb} esteja entre u_c e $u_a - u_c$, como mostra a Figura 5.2d.



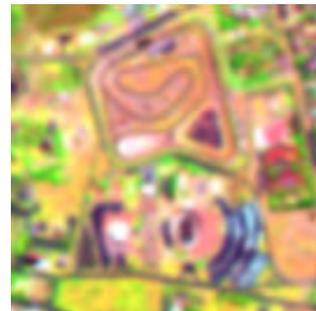
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 5.1 - Diferentes tipos de interpoladores. (a) imagem original; (b) Vizinho mais próximo; (c) Bilinear; (d) Convolução Cúbica.

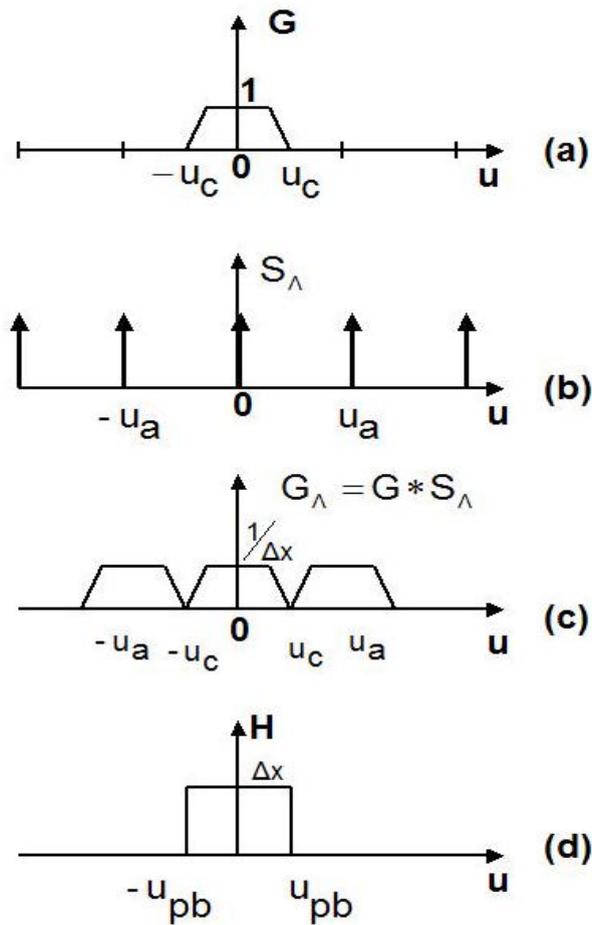


FIGURA 5.2 - Interpretação espectral do processo de reconstrução ideal.
 FONTE: Adaptada de Fonseca (1988).

Para um filtro passa-baixas ideal com frequência de corte u_{pb} , a resposta impulsiva h_1 é dada por:

$$h_1(x) = \frac{\text{sen}\left(2\pi u_{pb} x\right)}{2\pi u_{pb} x}, \quad (5.1)$$

e a resposta em frequência por:

$$H_l(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq u_{pb} \\ 0 & \text{fora.} \end{cases} \quad (5.2)$$

Este filtro deixa passar, sem distorções, o espectro do sinal no intervalo de frequência $|u| \leq u_{pb}$ como mostra a Figura 5.2d. Geralmente u_{pb} é escolhido como :

$$u_{pb} = \frac{u_a}{2} = \frac{1}{2\Delta x}. \quad (5.3)$$

O filtro passa-baixas ideal atua como um interpolador; os valores de g são determinados a partir de um conjunto infinito de amostras ponderadas pelos pesos do filtro nos instantes $n\Delta x$.

Na prática, o filtro ideal é irrealizável, pois requer um número infinito de amostras para determinar cada valor de g . Portanto, o filtro ideal deve ser aproximado por um filtro com resposta impulsiva finita, isto é,

$$h(x) = 0 \quad \text{para } x < x_1, x > x_2, \quad (5.4)$$

onde x_1 e x_2 são os limites inferior e superior.

Considere duas grades de amostragens diferentes τ_1 e τ_2 . O modelo do processo combinado, esquematizado na Figura 5.3, usando filtros de interpolação e de restauração pode ser escrito como

$$\hat{f}_{\tau_2} = g_{\tau_1} * [q_{\tau_2} * p_{\tau_2}], \quad (5.5)$$

onde \hat{f} é a estimativa de f e, q e p são os filtros de interpolação e restauração respectivamente. Os subscritos τ_1 e τ_2 são utilizados para definir as grades de amostragem sobre as quais as amostras do sinal são dispostas. É importante perceber que a entrada é definida sobre a grade τ_1 e a saída sobre a grade τ_2 .

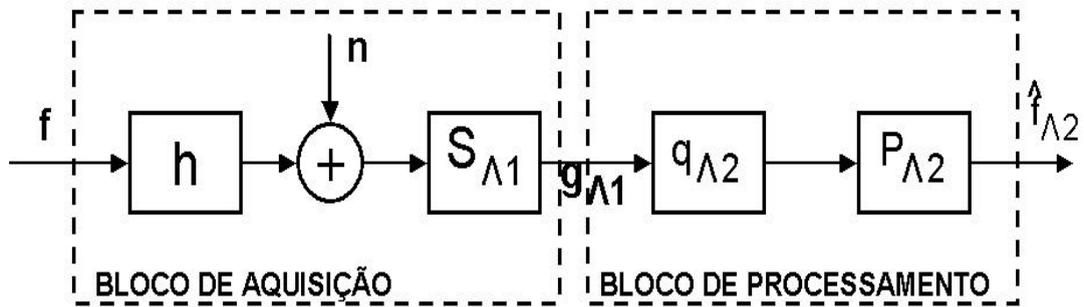


FIGURA 5.3 - Modelo do processo combinado de restauração-interpolação.

O modelo do processo de formação de imagens representado na Figura 5.3 é conhecido como modelo contínuo-discreto (Andrews e Hunt, 1977). Este modelo é considerado mais realista do ponto de vista físico e prático para representar o processo de aquisição de dados. Entretanto, somente aproximações do objeto contínuo são possíveis no processamento digital por computador. Desta forma, o modelo discreto-discreto torna-se útil e atraente.

Considerando o modelo discreto-discreto (Andrews e Hunt, 1977), o sinal de saída, desprezando o ruído, é dado por

$$g_{\Lambda 1} = h_{\Lambda 1} * f_{\Lambda 1}. \quad (5.6)$$

Substituindo a Equação 5.6 em 5.5 e aplicando a transformada de Fourier discreta, temos que

$$\hat{F}_{\Lambda 2}^* = F_{\Lambda 1}^* \cdot H_{\Lambda 1}^* \cdot Q_{\Lambda 2}^* \cdot P_{\Lambda 2}^* \quad , \quad (5.7)$$

$$\hat{F}_{\Lambda 2}^* = F_{\Lambda 1}^* \cdot H_{\Lambda 2}^* \quad (5.8)$$

onde Λ^* é o recíproco da grade de amostragem Λ e

$$H_{\Lambda 2}^* = \left[H_{\Lambda 1}^* \cdot Q_{\Lambda 2}^* \right] \cdot P_{\Lambda 2}^* \quad (5.9)$$

Neste caso são envolvidos dois processos para gerar uma imagem restaurada sobre uma grade de amostragem diferente: interpolação e restauração. Da Equação 5.9 pode-se concluir que o filtro de restauração $P_{?2}^*$ deve compensar os efeitos de $H_{?1}^*$ e $Q_{?2}^*$ para obter uma boa estimativa de $F_{?2}^*$. Este artifício permite a compensação do efeito de borrimento introduzido pelo processo de interpolação o que garante à imagem uma aparência mais realçada.

Considere agora que o filtro de interpolação seja do tipo ideal, substituindo a Equação 5.2 em 5.7 temos que

$$\hat{F}_{?2}^*(u) = F_{?1}^*(u) \cdot H_{?1}^*(u) \cdot P_{?2}^*(u) \quad \text{ou} \quad (5.10)$$

$$\hat{F}_{?2}^*(u) = G_{?1}^*(u) \cdot P_{?2}^*(u), \quad (5.11)$$

para u tal que $|u| \leq u_{pb}$.

A Equação 5.11 é importante porque estabelece que a estimativa $\hat{F}_{?2}^*$ pode ser obtida diretamente do filtro de restauração sem passar primeiro pelo processo de interpolação. O filtro de restauração pode ser projetado para compensar somente H . Sendo assim, a função compensada equivalente torna-se:

$$H_{?2}^* = H_{?1}^* \cdot P_{?2}^*. \quad (5.12)$$

Observa-se que a taxa de amostragem do sinal de entrada ($?1$) é diferente da taxa de amostragem do sinal de saída ($?2$). Portanto, o projeto do filtro envolve a teoria de sinais em múltiplas taxas de amostragem.

Fonseca projetou o filtro de restauração usando a teoria de filtros FIR e filtros em múltiplas taxas de amostragem. Detalhes da implementação do filtro de restauração podem ser obtidos em Fonseca (1988).

5.3 Projeto do Filtro Inverso Modificado

O projeto do filtro de restauração digital envolve, basicamente, os seguintes passos:

1. Determinação da função de transferência do sistema;
2. Determinação da função de transferência desejada para o sistema que se quer corrigir;
3. Escolha da função de janelamento para definir o tamanho do filtro digital.

A FTM do sistema tem sido definida no Capítulo 4. Portanto, vamos tratar nesta seção das fases 2 e 3.

A resposta em frequência ideal para um sistema é aquele que deixa passar toda a banda de um sinal sem distorção. Como, na prática, este sistema é irrealizável, procura-se aproximar a resposta em frequência do sistema por funções que tenham condição de gerar imagens com as seguintes características:

- alta resolução (detalhes bem nítidos na imagem);
- baixo nível de *overshoot* (variações bruscas na amplitude);
- baixo efeito de sobreposição do espectro.

Uma das funções que atende estes requisitos é a função abaixo (Fonseca, 1988):

$$D(u) = \begin{cases} 1 & 0 \leq u \leq u_w \\ 0.5(1 + \cos[p(u - u_w)/(u_c - u_w)]) & u_w \leq u \leq u_c \end{cases} \quad (5.13)$$

onde u_c é a frequência de corte do sistema. A idéia é conseguir que as bordas agudas da função retangular sejam substituídas por uma forma de onda cosseínodal. Esta função é muito atraente já que pelo ajuste da frequência u_w , algumas propriedades, tais como a resolução, por exemplo, podem ser modificadas.

A função desejada tem o objetivo de controlar a resposta em frequência do filtro de restauração. Este controle, então, é feito através do parâmetro u_w . O valor definido para u_w é a frequência para a qual a FTM do sistema imageador é igual a 0.5, que define a resolução efetiva do sistema (EIFOV). De acordo com Fonseca et al. (1993), se o valor de u_w for maior que esta frequência limite que caracteriza o EIFOV, o efeito do ruído já começa a degradar a imagem. Assim o plano em frequência fica dividido em duas partes:

- a “área de restauração”, como sendo a área compreendida entre a frequência u_w , ou seja, a região onde a FTM do sistema é maior ou igual a 0,5 e,
- a “área de supressão do ruído” como sendo a área onde a FTM é menor que 0,5.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de u_w , nas direções X e Y, para o sensor ETM+ normalizados em relação a frequência de amostragem dos sensores. Estes valores foram obtidos a partir das FTMs calculadas na seção 4.4.2.

TABELA 5.1 - Valores de u_w para o ETM+.

Bandas	u_{wx}	u_{wy}
Banda 1	0,42	0,49
Banda 2	0,41	0,45
Banda 3	0,40	0,44
Banda 4	0,38	0,43
Banda 5	0,43	0,43
Banda 7	0,44	0,48
PAN	0,31	0,34

As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram a função de transferência do sistema desejada e a FTM aproximada do sensor ETM+ para a banda 3 e banda pan, respectivamente.

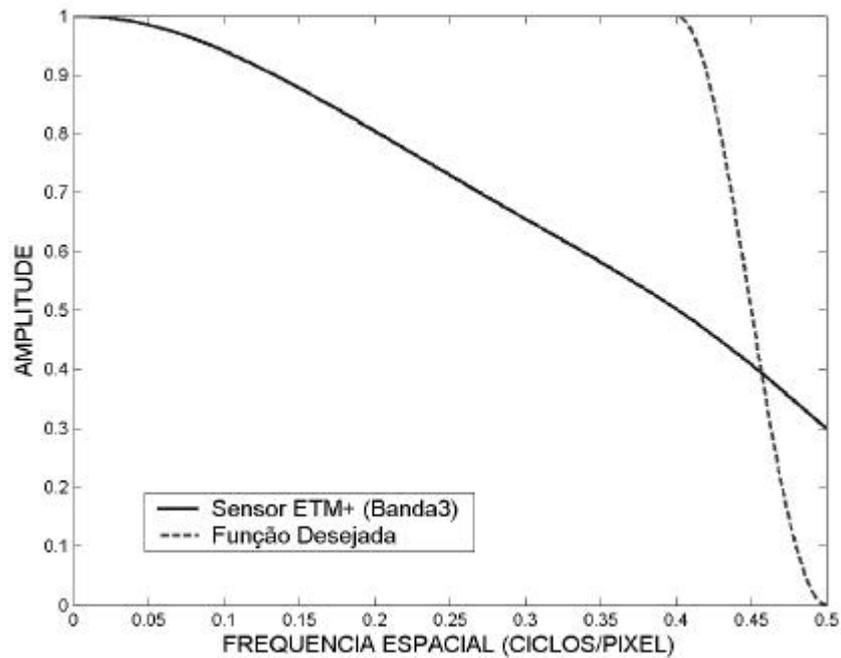


FIGURA 5.4 - Função desejada e a FTM do sensor ETM+ (banda 3).

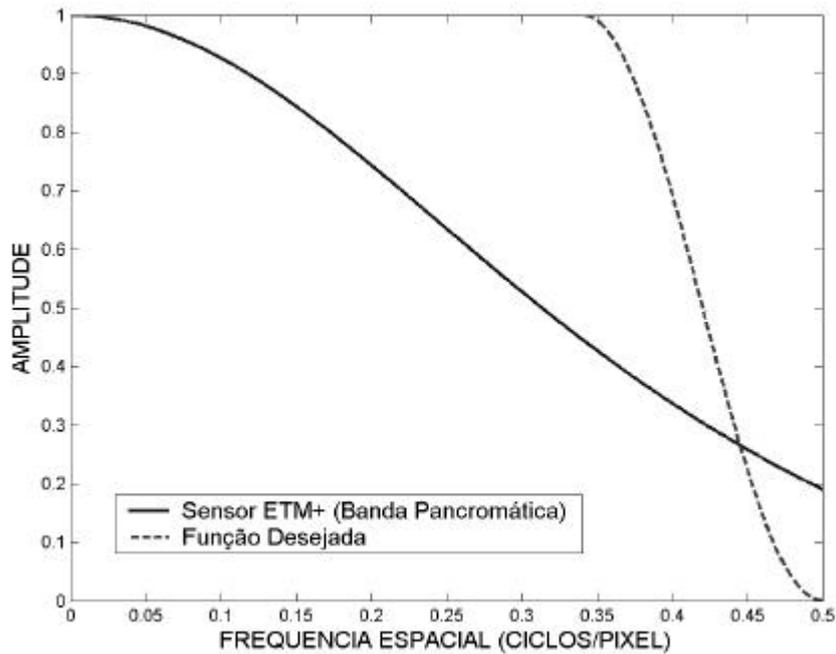


FIGURA 5.5 - Função desejada e a FTM do sensor ETM+ (banda pan).

Janelamento

Dentre as técnicas de projeto de filtros FIR (Finite Impulse Response) destaca-se a técnica de janelamento pela sua facilidade de uso e a maneira direta com que pode ser implementada.

A resposta em frequência do filtro, P , pode ser expandida em série de Fourier da forma:

$$P(u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(n) e^{-j2unp}, \quad (5.14)$$

onde p é a resposta impulsiva do filtro representada por

$$p(u) = \frac{1}{u_a} \int_0^{u_a} P(u) e^{-j2unp} du, \quad (5.15)$$

onde u_a é a frequência de amostragem. A resposta impulsiva tem duração infinita o que torna o filtro irrealizável.

Uma forma de obter um filtro de resposta finita é truncando a série infinita em $n = \pm(N-1)/2$, onde N define o tamanho do filtro. O truncamento direto dá origem ao fenômeno de Gibbs: a resposta em frequência oscila perto das descontinuidades (Rabiner e Gold, 1975).

Uma solução mais viável para obter um filtro FIR é usar um truncamento menos abrupto para controlar a convergência da série de Fourier. Ou seja, usa-se uma seqüência finita de pesos $j(n)$, chamada de janela, que reduz gradualmente a amplitude da resposta impulsiva do filtro até o valor 0 modificando assim os coeficientes do filtro $p(n)$,

$$\hat{p}(n) = p(n)j(n) \quad - (N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2, \quad (5.16)$$

onde \hat{p} é a resposta impulsiva do filtro truncado e j é uma janela simétrica de N (ímpar) pontos que gera um filtro de tamanho finito N . Esta técnica é conhecida por janelamento. A Figura 5.6 mostra a resposta impulsiva ideal do filtro (5.6a), a seqüência de pesos da janela (5.6b) e a resposta impulsiva do filtro resultante (5.6c), respectivamente.

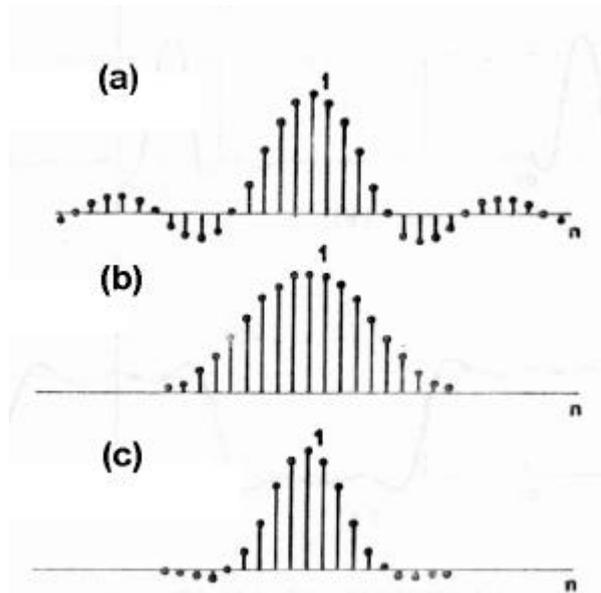


FIGURA 5.6 - Ilustração do projeto do filtro FIR por janelamento.
 FONTE: Oppenheim e Schafer (1975).

A ponderação dos coeficientes do filtro por $j(n)$, no domínio do tempo ou espaço, é equivalente à convolução da transformada de Fourier de p , P , pela transformada de Fourier da janela j , J :

$$\hat{P} = P * J, \quad (5.17)$$

onde \hat{P} é a resposta em freqüência do filtro truncado pela janela. A Figura 5.7 mostra a resposta do filtro desejado (filtro ideal) e o resultado da aproximação através da técnica de janelamento.

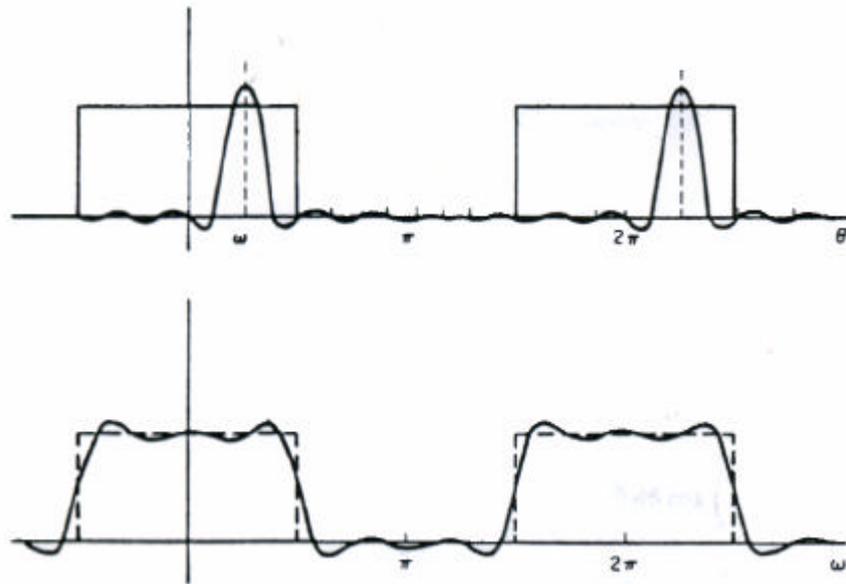


FIGURA 5.7 - Efeito do janelamento. (a) Operação de convolução do filtro com a resposta em freqüência da janela.(b) Resultado do truncamento.

Pode-se observar dois efeitos na resposta em freqüência do filtro resultante. O primeiro efeito ocorre nas discontinuidades (variações bruscas) da resposta em freqüência do filtro. O segundo efeito é que os lóbulos laterais (regiões de pouca energia) de J produzem erros de aproximação (oscilações na resposta em freqüência do filtro resultante). Para evitar estes efeitos, a resposta em freqüência das janelas deve ter duas características desejáveis: a largura do lóbulo principal (região de maior energia) deve ser pequena com tanta energia quanto possível e os lóbulos laterais devem ter um rápido decaimento.

Fonseca (1988) mostrou que, as janelas de Shlien, Hanning, cossenoidal, Kaiser, as quais apresentaram melhores resultados no trabalho de Câmara Neto e Mascarenhas (1983), não resultaram em diferenças significativas. Neste trabalho, as janelas de Hanning, Hamming, Triangular e Bartlett foram testadas. A Figura 5.8 mostra a função desejada truncada com $N = 11$ pelas janelas de Hanning, Hamming, Triangular e Bartlett.

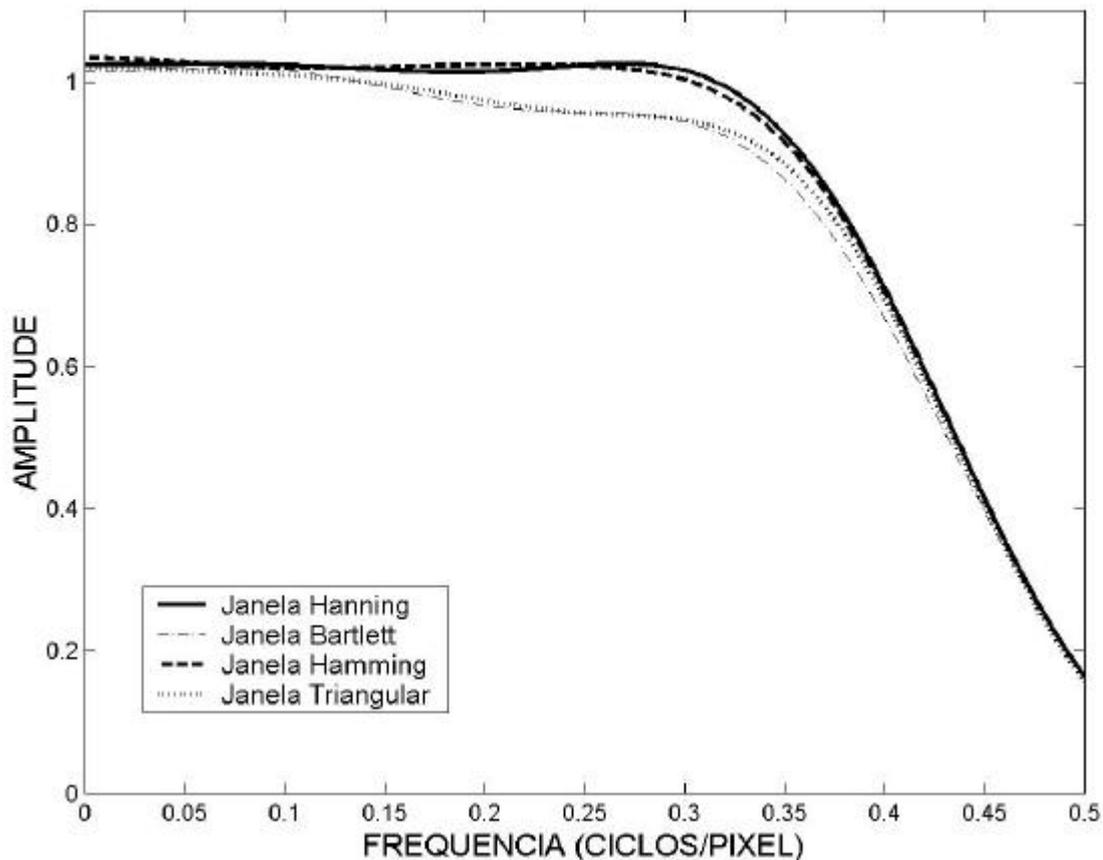


FIGURA 5.8 - Efeito do truncamento ($N = 11$) sobre a função desejada para diferentes janelas.

Como também observado por Fonseca (1988), as imagens processadas com filtros de restauração projetados com as janelas mencionadas, visualmente, não apresentaram diferenças significativas. O critério escolhido para a escolha da janela, portanto, foi a maior aproximação com a função desejada. Dada esta condição, a janela de Hanning foi a escolhida para a implementação do filtro de restauração.

Para determinar o tamanho do filtro, o efeito do truncamento da função desejada foi avaliado através da comparação da função desejada para diversos truncamentos. A Figura 5.9 mostra as curvas da função desejada para truncamentos com $N = 7, 9, 11, 13$ com a janela de Hanning.

Pode-se observar que o truncamento por janelamento causa atenuação da função desejada cada vez maior à medida que diminui o tamanho do filtro.

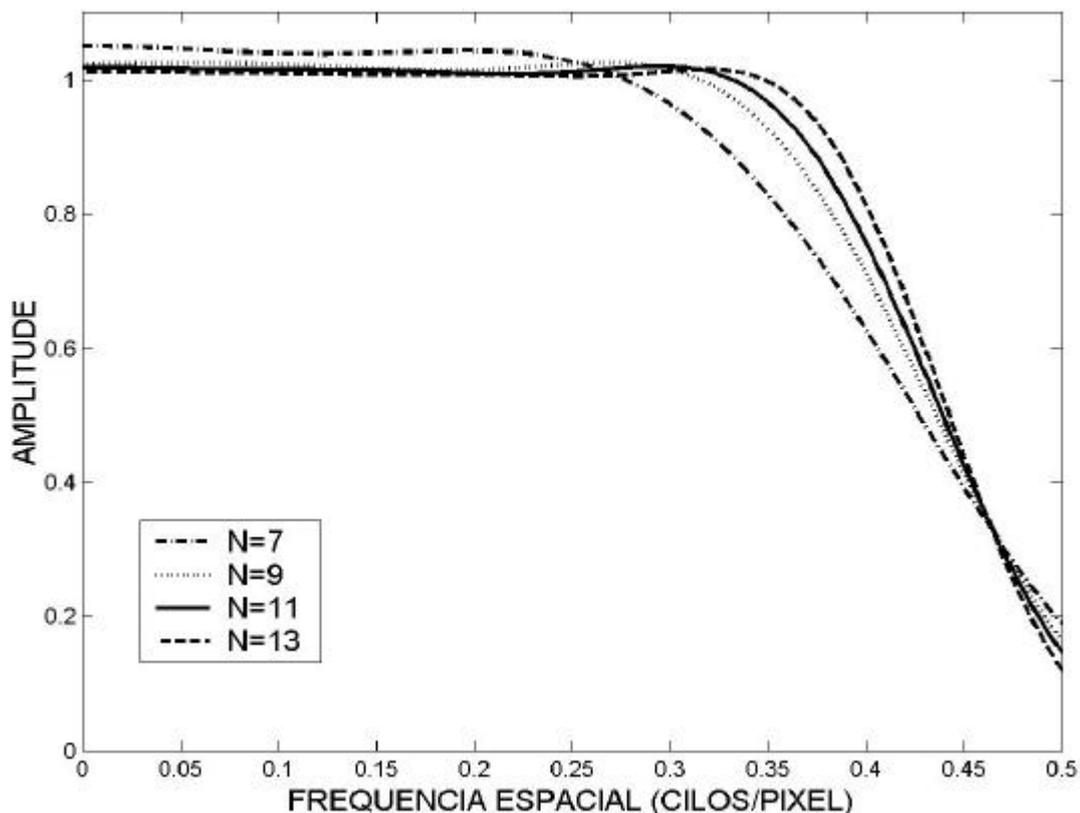


FIGURA 5.9 - Efeito do truncamento (Janela de Hanning) para diferentes valores de N.

Pelas experiências observadas, um filtro de restauração com $N = 11$ é suficiente para gerar imagens com qualidade visual, visto que o uso de filtros maiores eleva o custo computacional do processamento, sem melhorias significativas.

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram o efeito de truncamento do filtro de restauração para as bandas 3 e pan do ETM+. Pode-se observar uma ligeira atenuação da resposta do filtro na região de frequências onde ocorre o realce e um pequeno aumento na largura da resposta impulsiva do sensor.

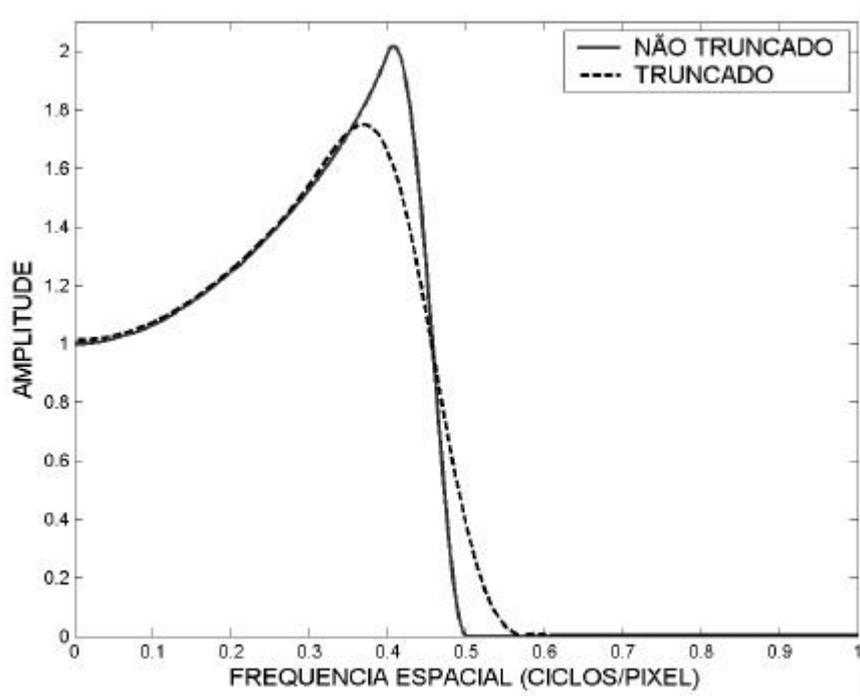


FIGURA 5.10 - Resposta do filtro de restauração antes do truncamento e depois do truncamento para a banda 3.

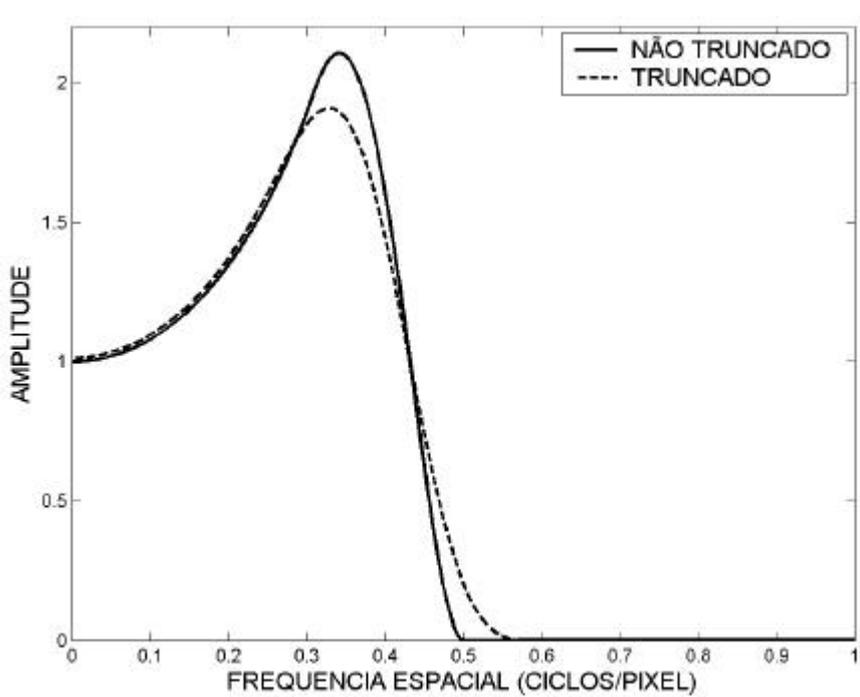


FIGURA 5.11 - Resposta do filtro de restauração antes do truncamento e depois do truncamento para a banda pancromática.

5.4 Implementação do Filtro de Restauração

Esta seção tem por finalidade apresentar a interface do filtro de restauração “IMAGE RESTORATION”, bem como as especificações técnicas e o modo de utilização deste aplicativo.

Baseada na teoria apresentada nos capítulos 4 e 5, os coeficientes do filtro de restauração foram determinados para cada banda. De fato, o conjunto de coeficientes do filtro de restauração é diferente para cada taxa de amostragem de saída. Para atender as limitações de implementação de filtros digitais em multi-taxas, os tamanhos de pixel de saída são pré-fixados.

Se a taxa de amostragem do sinal de entrada é igual à do sinal de saída, o filtro é definido com 11 coeficientes. Para gerar uma imagem ETM+ (tamanho de pixel = 30 metros) em uma grade de amostragem de tamanho igual a 15 metros, o filtro deve ter 21 coeficientes. Os coeficientes do filtro de restauração, nas direções x e y, para redução da taxa por um fator de 2, são dados na tabela abaixo. Deve-se observar que o filtro é simétrico e somente a metade dos coeficientes é mostrada nesta tabela. Pode-se observar que como o filtro de restauração é um filtro de realce, alguns dos coeficientes aparecem negativos.

TABELA 5.2 - Coeficientes do filtro de restauração.

M	Banda 3		Banda Pancromática	
	x	Y	x	y
0	1,22668	1,24248	1,26341	1,37359
1	0,744609	0,727289	0,79592	0,858413
2	-0,0810565	-0,120309	-0,041745	-0,0671262
3	-0,337255	-0,320937	-0,376337	-0,440291
4	-0,0682752	-0,0158719	-0,153140	-0,193010
5	0,115890	0,125602	0,0817994	0,0775590
6	0,0489061	0,0222777	0,0757398	0,0845459

7	-0,0244101	-0,0348072	-0,00099581	-0,00565183
8	-0,0129154	-0,00733615	-0,0125587	-0,00112035
9	-0,00116619	-0,00285335	-0,00128254	-0,00133233
10	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000

A interface do aplicativo de restauração de imagens foi desenvolvida em ambiente *Qt* da *Trolltech* por Dimitri Fedorov (Figura 5.12) e o programa principal desenvolvido em Visual C++. Este aplicativo foi desenvolvido para restaurar imagens do Landsat-5, SPOT, CBERS. Posteriormente, o filtro de restauração para o Landsat-7, desenvolvido neste trabalho, foi adicionado neste aplicativo.



FIGURA 5.12 - Interface do Aplicativo de restauração. IMAGE RESTORATION.

O aplicativo disponibiliza as seguintes funcionalidades:

- Visualização das imagens monocromáticas que serão restauradas;
- Barra de andamento do processo;
- Visualização do resultado na tela;
- Possibilidade de salvar a imagem restaurada em disco.

O aplicativo “IMAGE RESTORATION” permite ao usuário restaurar imagens originais em diversos tipos de compressão tais como JPG, TIF, BMP, GIF, JPEG e outros (Figura 5.13).

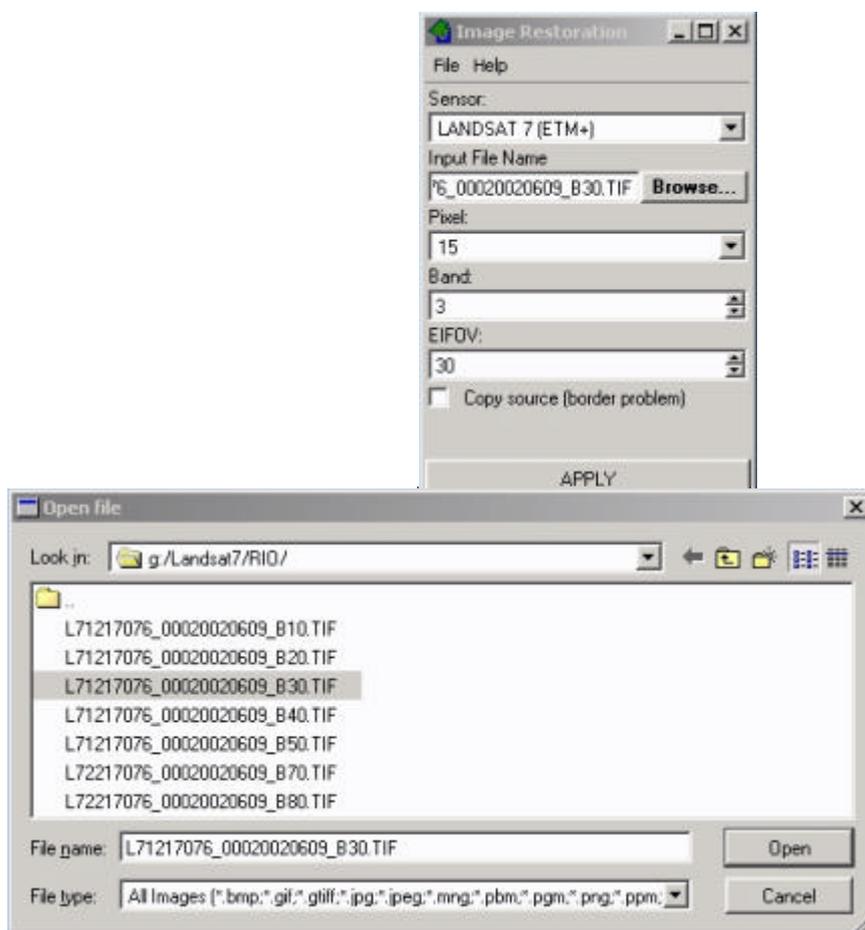


FIGURA 5.13 - Abrindo um arquivo no aplicativo IMAGE RESTORATION.

Ao abrir a imagem que deseja restaurar (Figura 5.14), o usuário deve indicar o sensor que gerou a imagem:

- SPOT – PAN;
- SPOT – X;
- LANDSAT-5 – TM;
- LANDSAT-7 – ETM+;
- LANDSAT-7 – PAN;
- CBERS – CCD.

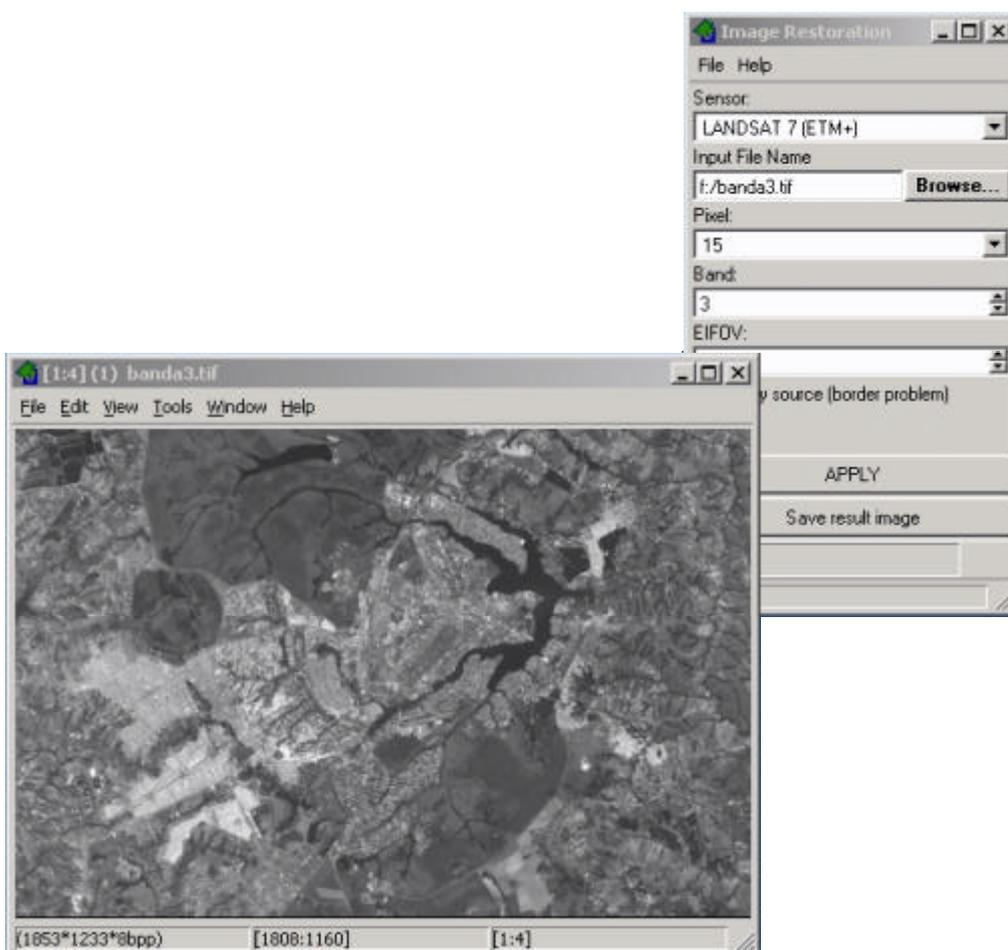


FIGURA 5.14- Visualizando a imagem a ser restaurada.

Definido o sensor, o próximo passo é identificar o tamanho do pixel que terá a imagem de saída. Para as bandas espectrais de 1 a 5 e 7 do Landsat-7 existe a possibilidade de restaurar a imagem para 30, 20, 15, 10 e 5 metros. Já para a banda pancromática a restauração pode ser feita para 15, 10, 7.5, 5 e 2.5 metros. O último passo para a restauração é, justamente, definir a banda a ser restaurada.

Após a execução da restauração (Figura 5.15), a imagem restaurada é visualizada na tela (Figura 5.16). O usuário, então, pode realizar diversas operações tais como fazer uma aproximação da imagem (zoom), colocar a imagem em tela cheia, saber a coordenada de pixel de determinado ponto e etc. Feitos estes procedimentos, o que resta é salvar o resultado em disco, e aí, o usuário também tem a possibilidade de salvar a imagem nos diversos formatos mencionados anteriormente.

Uma outra opção é a implementação do filtro de restauração para o Landsat-7 no SPRING.

O código do filtro e a geração de todos os gráficos deste trabalho também foram desenvolvidos em ambiente MATLAB.

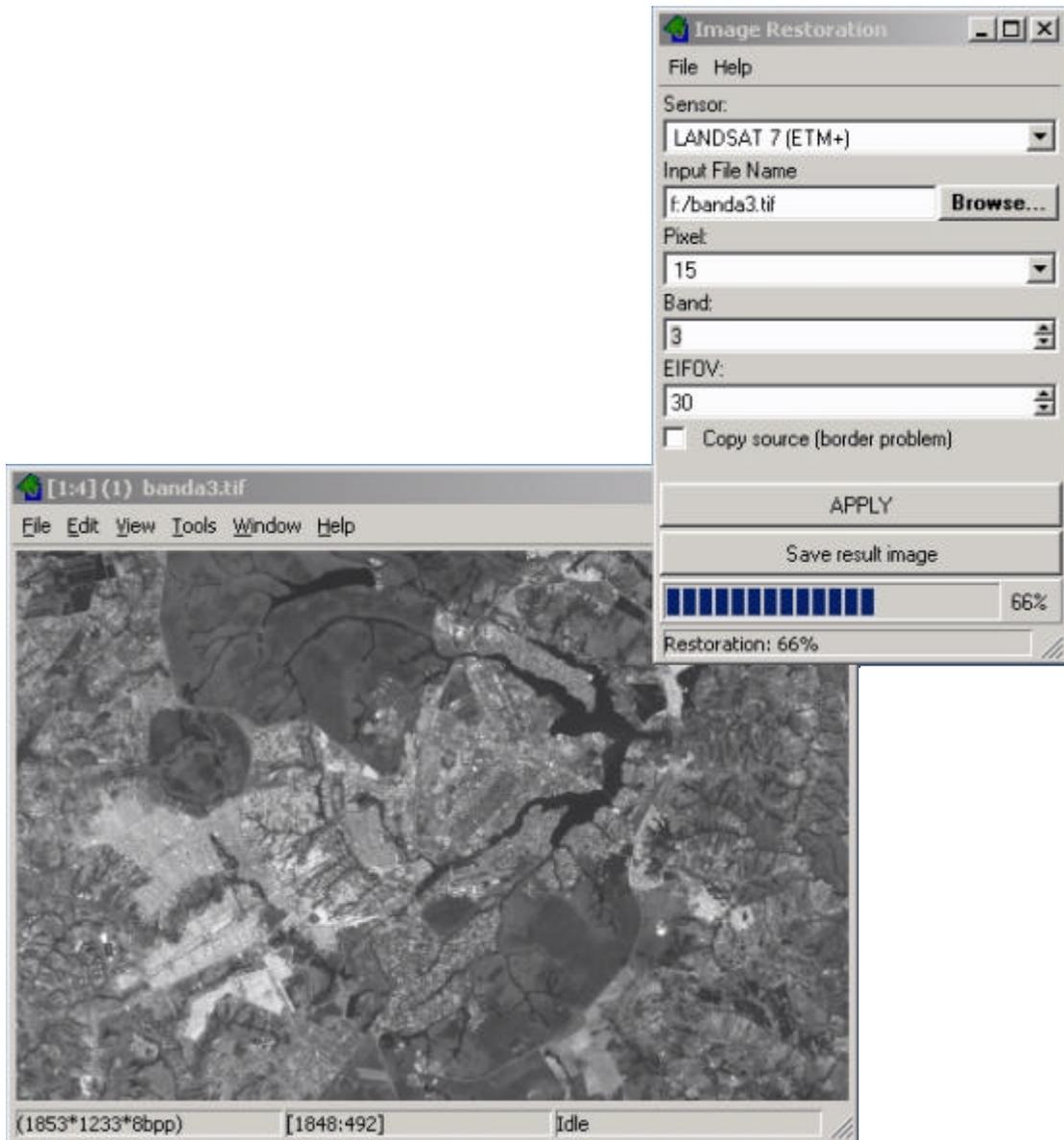


FIGURA 5.15 - Restaurando a imagem.

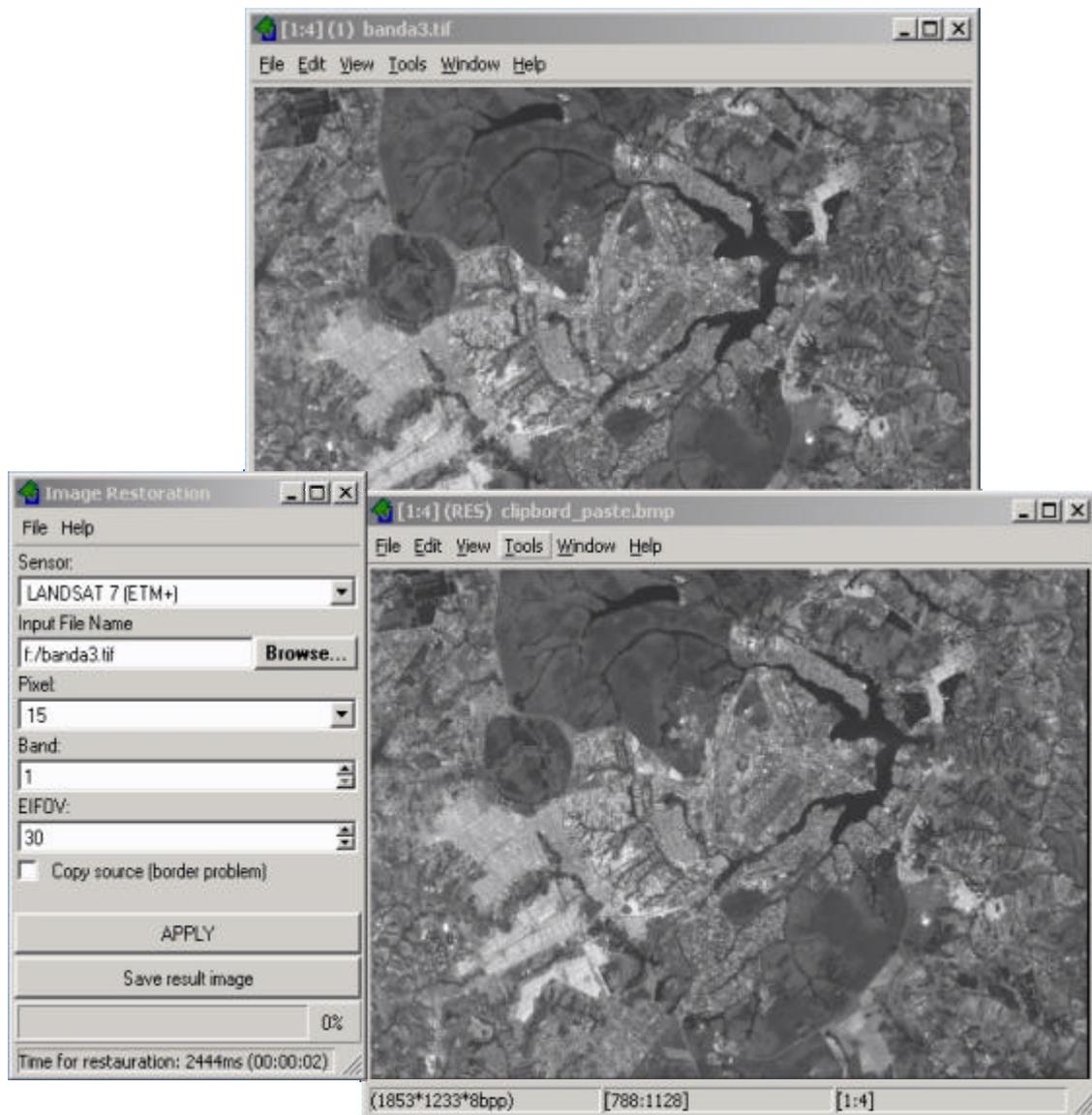


FIGURA 5.16 - Visualizando o resultado final e salvando a imagem restaurada.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Alguns experimentos foram realizados para testar os filtros de restauração para reamostrar (interpolat) as imagens de diferentes regiões geradas pelo sensor ETM+ do Landsat-7.

Os resultados deste trabalho são apresentados separados por área de estudo, e dentro de cada área, divididos em:

- imagens interpoladas com o filtro de restauração, e,
- interpoladas com convolução cúbica

Composições coloridas com as imagens restauradas e interpoladas são apresentadas e comparadas com as imagens originais. A Tabela 6.1 descreve os experimentos realizados e as imagens utilizadas em cada um deles. Para reduzir o volume de imagens e de dados neste documento foram selecionados alguns casos escolhidos aleatoriamente. Estes casos aparecem destacados em negrito, na terceira coluna (BANDAS) da Tabela 6.1. É importante mencionar que as imagens utilizadas, neste trabalho, apenas sofreram correção do efeito de rotação da Terra sobre a passagem do satélite.

As Funções de Transferência do ETM+ são estimadas segundo a metodologia apresentada no Capítulo 4. No projeto do filtro é utilizada a função desejada descrita pela Equação 5.13 e os parâmetros definidos na Tabela 5.1. A resposta impulsiva do filtro é truncada pela Janela de Hanning no tamanho de $N = 11$ ao longo da linha e da coluna da imagem. Os argumentos que validam estas escolhas são apresentados na seção 5.3 do Capítulo 5.

TABELA 6.1 – Relação das áreas de estudo e imagens utilizadas em cada caso.

ÁREA DE ESTUDO	DATA	BANDAS	MÉTODO
Rio de Janeiro/RJ	09/06/2002	1, 2, 3, 4 e 5	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 15 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 15 metros
Rio de Janeiro/RJ	09/06/2002	pancromática	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 7,5 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 7,5 metros
Brasília/DF	05/06/2002	3, 4, 5	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 15 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 15 metros
Brasília/DF	05/06/2002	pancromática	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 10 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 10 metros
Vale do Paraíba/SP	19/08/2002	3, 4, 5	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 10 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 10 metros
Vale do Paraíba/SP	19/08/2002	pancromática	<ul style="list-style-type: none"> • Restauração para 5 metros • Interpolação por Convolução Cúbica para 5 metros

Um estudo de avaliação das imagens restauradas é realizado para todas as bandas, exceto para a banda 6 (termal). As imagens restauradas são comparadas às imagens reamostradas com o interpolador de convolução cúbica.

Em cada área de estudo, os resultados são avaliados pelos testes descritos mais adiante e são apresentados na seguinte seqüência:

- (a) Teste de qualidade visual;
- (b) Diferença de imagens mostrando as magnitudes e posições das diferenças;
- (c) Estatísticas das imagens através da variância;
- (d) Perfil radiométrico ao longo de uma linha das imagens;

6.1 Avaliação das Imagens Restauradas

A avaliação é feita segundo os critérios apresentados abaixo.

Qualidade Visual

Este teste procura identificar as diferenças visuais entre a imagem restaurada e a interpolada, buscando reconhecer feições lineares tais como ruas, aeroportos, pontes e bordas. O processo de convolução cúbica tende a atenuar as altas freqüências gerando uma imagem mais borrada, enquanto que a imagem restaurada tende a apresentar transições mais nítidas entre os pixels.

Diferença de Imagens

A diferença de imagens é obtida através de uma subtração pixel-a-pixel (restaurada e interpolada). Como o realce ocorre, principalmente, em feições lineares tais como ruas, aeroportos, etc, estas feições devem aparecer mais realçadas nas imagens restauradas do que nas interpoladas pelo ICC. O efeito de realce ocorre devido ao aumento da diferença dos níveis de cinza da feição

em relação ao fundo. Portanto, a identificação da melhoria observada na imagem restaurada pode ser visualizada na imagem diferença, onde as variações são mais bruscas. A imagem diferença destaca qualquer traço de estrutura presente em uma imagem e ausente na outra.

Estatística

Como os coeficientes do filtro são normalizados, a média da imagem restaurada deve ser preservada. Uma forma de avaliar o realce de contraste de uma imagem é o desvio padrão ou variância. Um valor de variância alto é indicativo da presença de mais detalhes na imagem. Assim, as variâncias para cada canal espectral das imagens originais, interpoladas e restauradas são usadas para avaliar o efeito do filtro de restauração.

Perfil Radiométrico

É escolhida uma linha da imagem restaurada e a mesma linha da imagem interpolada para uma análise do comportamento radiométrico da mesma. As variações abruptas na imagem sem ruído podem ser relacionadas com detalhes na imagem. Estas variações, geralmente, ocorrem onde aparecem feições lineares, bordas e contornos dos objetos. Então, são nestes detalhes que deve ser dada mais atenção.

6.2 Área de Estudo I: Rio de Janeiro/RJ

Qualidade Visual

Neste experimento, foram utilizadas imagens da região que compreende a cidade do Rio de Janeiro/RJ, adquiridas no dia 09 de junho de 2002. As bandas 1, 2, 3, 4, 5 foram reamostradas para 15 metros utilizando o filtro de restauração proposto e a interpolação por Convolução Cúbica implementada

no software ENVI 3.5 da RESEARCH SYSTEMS. A banda pancromática foi reamostrada para 7,5 metros (dobro da taxa de amostragem).

A Figura 6.1 mostra a área do Rio de Janeiro escolhida para a análise e as Figuras 6.2 a 6.7 correspondem à seqüência de imagens interpoladas e restauradas da área escolhida, para as bandas 1, 2 e 3 respectivamente.

As Figuras 6.8 a 6.10 mostram uma composição colorida (1B, 2G, 3R) realizada com as imagens originais, interpoladas e restauradas, respectivamente.



FIGURA 6.1 - Imagem original da cidade do Rio de Janeiro/RJ, banda 1, pixel = 30 m.



FIGURA 6.2 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 1, pixel = 15 m.



FIGURA 6.3 - Imagem restaurada, banda 1, pixel = 15 m.



FIGURA 6.4 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 2, pixel = 15 m.



FIGURA 6.5 - Imagem restaurada, banda 2, pixel = 15 m.



FIGURA 6.6 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 3, pixel = 15 m.



FIGURA 6.7 - Imagem restaurada, banda 3, pixel= 15 m.



FIGURA 6.8 - Composição colorida com imagens originais, (1B, 2G, 3R) com pixel = 30 metros.



FIGURA 6.9 - Composição colorida com imagens interpoladas por ICC, (1B, 2G, 3R) com pixel = 15 metros. Estádio do Maracanã - RJ.



FIGURA 6.10 - Composição colorida com imagens restauradas, (1B, 2G, 3R) com pixel = 15 metros. Estádio do Maracanã - RJ.

O experimento anterior também foi realizado para a banda pancromática apresentado na seqüência de Figuras de 6.11 a 6.13.

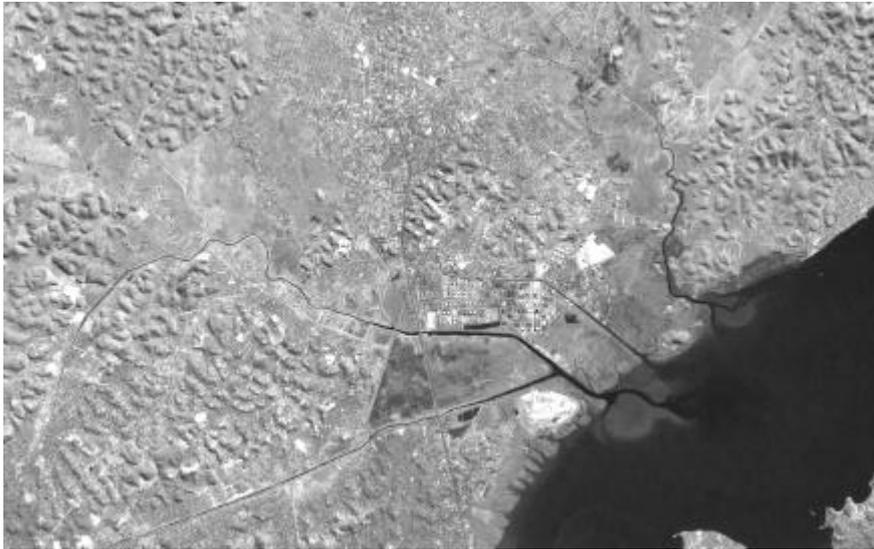


FIGURA 6.11 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.



FIGURA 6.12 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 7,5 m.

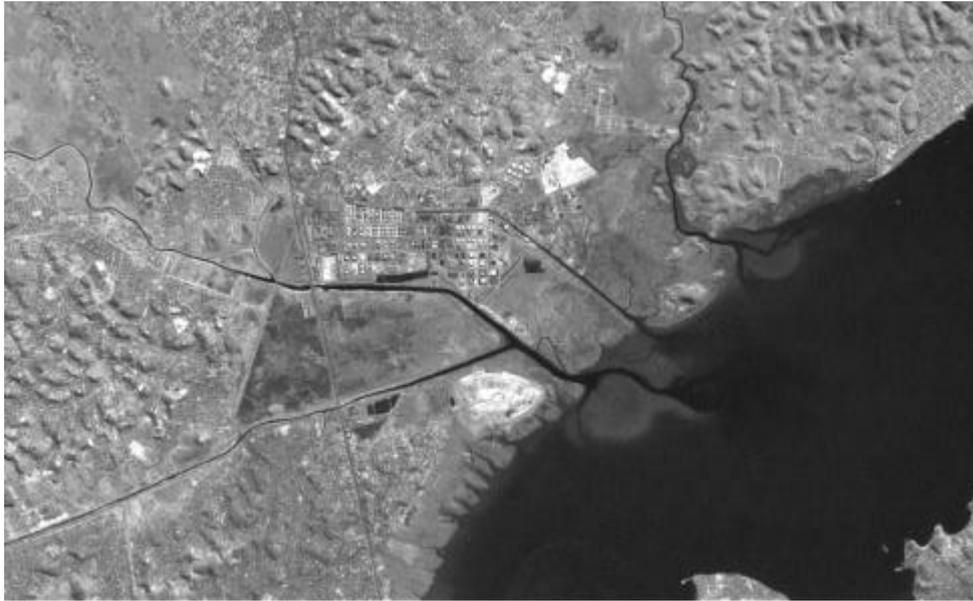


FIGURA 6.13 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 7,5 m.

As diferenças entre as imagens interpoladas e restauradas se manifestam com maior nitidez nas bordas ou em objetos que exibam mais contraste em relação às áreas vizinhas. Objetos lineares aparecem mais realçados nas imagens restauradas.

É interessante frisar que o processo de convolução cúbica atenua as altas frequências presentes na imagem, criando, portanto, uma imagem mais suavizada. De uma forma contrária, o filtro de restauração amplifica as componentes em frequência altas, gerando imagens com transições mais agudas entre os pixels.

Nestas imagens do Rio de Janeiro ficam ainda mais evidenciados os efeitos da restauração quando as comparações são realizadas nas ruas próximas ao Estádio do Maracanã e nas pistas do aeroporto. A diferença visual também é clara quando vista em composições coloridas mostradas nas Figuras 6.8 a 6.10. Pode-se observar ainda que na Figura 6.10 o formato arredondado do estádio fica mais bem evidenciado do que na imagem interpolada. Na Figura 6.13, banda pan, as ruas ficam bem definidas. Em estudos urbanos, onde se

tem a necessidade de visualizar detalhamento de ruas, e quando não se tem imagem de melhor resolução, o uso da restauração é uma boa alternativa. Esta metodologia tem sido usada com bastante frequência para reamostrar dados do TM-5, ETM+ por pesquisadores do INPE (Gherardi et al., 2001; Carvalho & Gherardi, 2003).

Diferença de Imagens

Valores da imagem diferença próximos de zero (preto) são indicativos da semelhança entre as imagens, enquanto que valores próximos de 255 (branco), indicam uma maior discrepância entre as imagens.

Como se pode observar nas imagens das Figuras 6.14 (banda 3) e 6.15 (banda pancromática), as diferenças mais aparentes ocorrem nas bordas e feições lineares.

A imagem interpolada pelo ICC apresenta um efeito de borramento ou suavização; os valores baixos correspondentes ao lado escuro de um objeto são levemente aumentados e os valores altos, relativos ao lado brilhante da borda, são reduzidos. O processo de restauração diminui o efeito de suavização e produz transições mais agudas nos contornos aumentando, portanto, a noção de nitidez. A pista do aeroporto aparece mais realçada nas imagens restauradas do que nas interpoladas por ICC. Dessa forma, é natural que na imagem diferença esta feição apareça mais definida.



FIGURA 6.14 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 3.



FIGURA 6.15 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.

Estatística

Os valores de variância das imagens originais, interpoladas e restauradas são apresentados na Tabela 6.2. As variâncias das imagens restauradas são um pouco maiores que as obtidas para as imagens originais, o que evidencia uma melhora no nível de detalhes das imagens restauradas. Pode-se observar que a redução dos valores de variância nas imagens interpoladas é uma consequência da perda de detalhes devido ao efeito de borramento. A diferença média entre as variâncias das bandas espectrais interpoladas e restauradas está em torno de 10% e da banda pancromática, 12%.

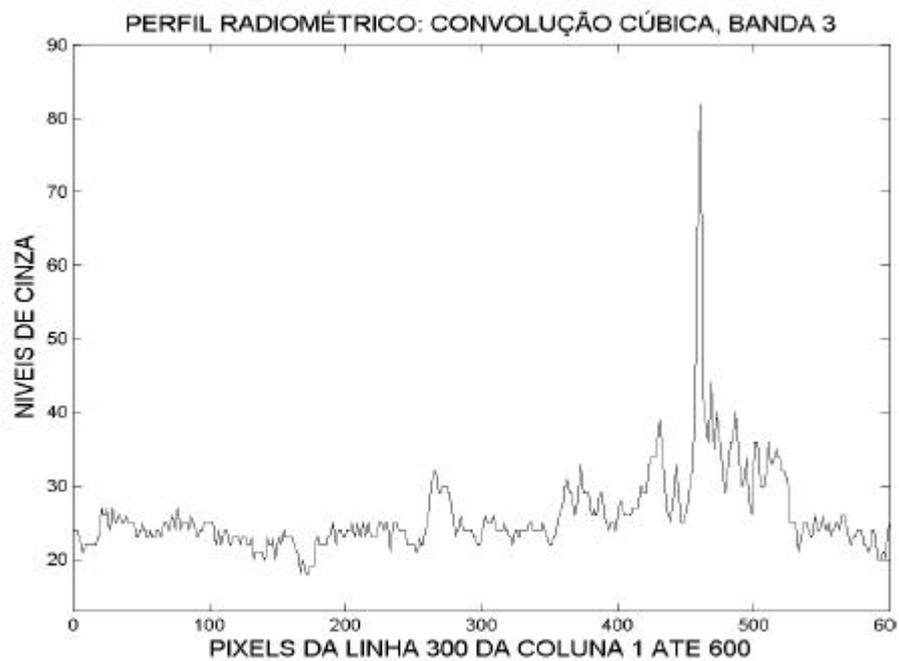
TABELA 6.2 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo I – Rio de Janeiro/RJ.

Bandas	Método	Variância
Banda 1	Original	58,3696
	Convolução Cúbica	55,2049
	Restauração	63,8401
Banda 2	Original	93,1225
	Convolução Cúbica	89,4916
	Restauração	100,8016
Banda 3	Original	193,21
	Convolução Cúbica	185,2321
	Restauração	210,8304
Banda 4	Original	835,7881
	Convolução Cúbica	823,69
	Restauração	872,0209
Banda 5	Original	670,2921
	Convolução Cúbica	652,8025
	Restauração	706,4964

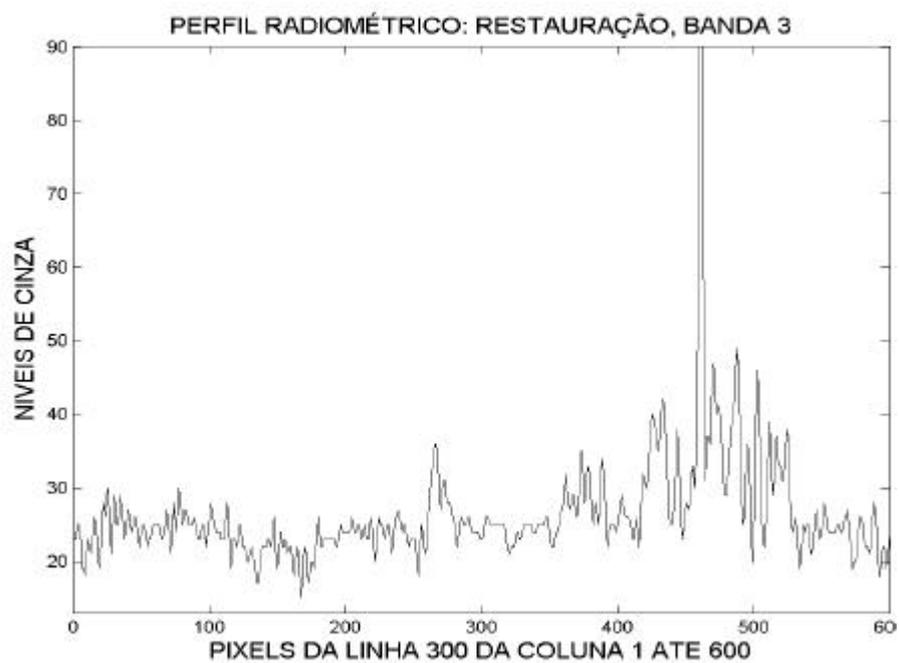
Banda 7	Original	290,3616
	Convolução Cúbica	278,5561
	Restauração	312,9361
Banda Pan	Original	152,5225
	Convolução Cúbica	150,0625
	Restauração	169,2601

Perfil Radiométrico

As Figuras 6.16 e 6.17 mostram os perfis radiométricos das bandas 3 e pan, ambas interpoladas e restauradas, em uma dada linha das imagens. Pode-se observar que, onde aparecem picos ou vales acentuados os valores obtidos pela restauração são, geralmente, mais extremos. Em áreas mais homogêneas pode-se observar que os valores das imagens restauradas mostram pequenas flutuações onde a interpolada é, aproximadamente, plana. Neste caso, o filtro de restauração pode ter realçado um detalhe fino na imagem ou o interpolador pode ter suavizado o detalhe.



(a)



(b)

FIGURA 6.16 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 3.
(a) Interpolada, (b) Restaurada.



FIGURA 6.17 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática.
(a) Interpolada, (b) Restaurada.

6.3 Área de Estudo II: Brasília/DF

Qualidade Visual

Neste experimento, foram utilizadas imagens da região que compreende a cidade de Brasília/DF, adquiridas no dia 05 de junho de 2002. As bandas 3, 4 e 5 foram reamostradas para 15 metros utilizando o filtro de restauração e a interpolação por Convolução Cúbica. A banda pancromática foi reamostrada para 10 metros.

A Figura 6.18 mostra a área de Brasília escolhida para a análise, e as Figuras 6.19 e 6.20 correspondem às imagens da banda 4 interpoladas e restauradas, respectivamente. Na imagem restaurada (Figura 6.20) é fácil perceber uma melhor definição da via principal. Os contornos das feições lineares são mais perceptíveis. Isto não ocorre com a imagem interpolada (Figura 6.19) que, por atenuar as altas frequências, perdeu um pouco o aspecto de nitidez.

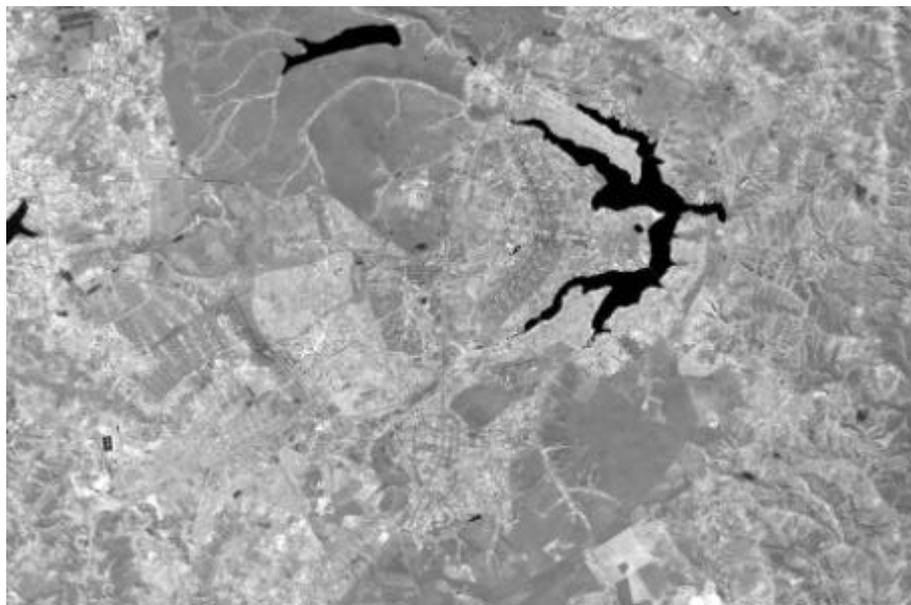


FIGURA 6.18 - Imagem original da cidade de Brasília/DF, banda 4, pixel = 30 m.



FIGURA 6.19 - Imagem interpolada por Convolução Cúbica, banda 4, pixel = 15 metros.



FIGURA 6.20 - Imagem restaurada, banda 4, pixel = 15 metros.

As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23 mostram composições coloridas (3B, 4G, 5R) realizadas com as imagens originais, interpoladas e restauradas, respectivamente.

O que melhor se observa é o contorno mais acentuado da pista do aeroporto e o sistema de arruamento da cidade na Figura 6.23 (restaurada). Embora seja característica do filtro de restauração que as bordas das feições fiquem mais evidentes, o que se percebe neste experimento é que toda a imagem aparece com um aspecto mais realçado. Esta análise é feita em cima da área ao redor da mancha urbana, que ficou melhor definida.

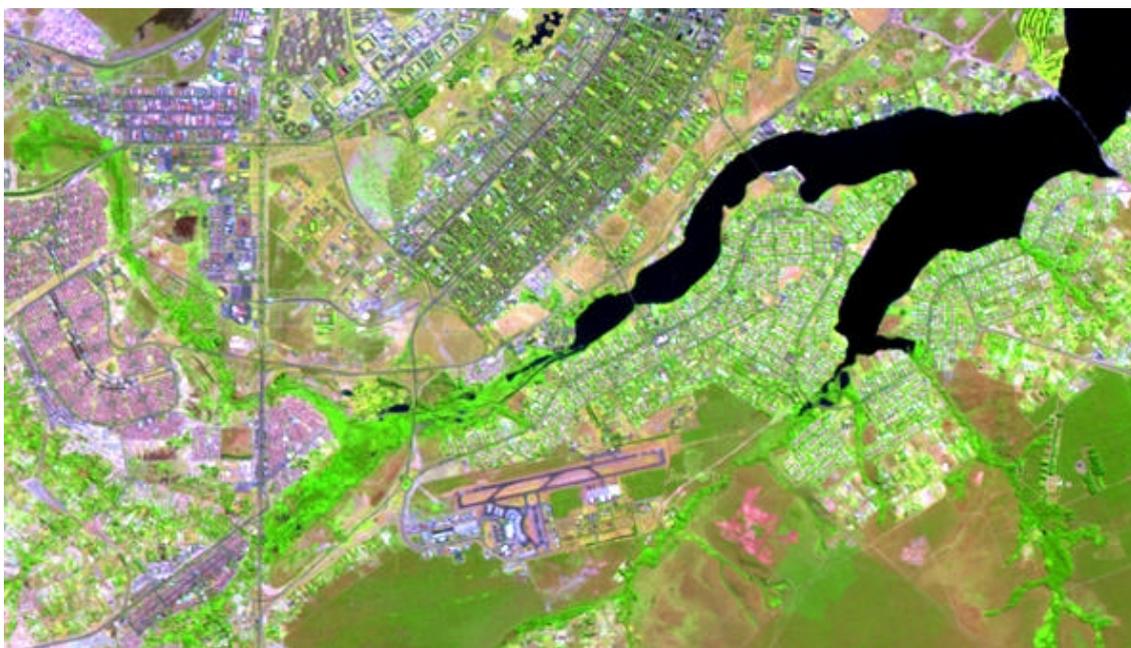


FIGURA 6.21 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 metros.



FIGURA 6.22 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m. Pista do Aeroporto.



FIGURA 6.23 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m. Pista do Aeroporto.

O sistema de ruas da cidade aparece em destaque Figura 6.26. Os resultados visuais quanto à melhoria da qualidade espacial nas imagens restauradas são facilmente percebidos nesta imagem. De maneira contrária, a Figura 6.25 mostra uma imagem com perda de detalhes característica do interpolador de convolução cúbica.



FIGURA 6.24 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 m.



FIGURA 6.25 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m.



FIGURA 6.26 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 15 m.

O experimento realizado para a banda pancromática é apresentado na seqüência de Figuras de 6.27 a 6.29.



FIGURA 6.27 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.



FIGURA 6.28 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 10 m.



FIGURA 6.29 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 10 m.

Pode-se observar uma melhoria significativa das imagens quando estas são processadas pelo filtro de restauração. Na imagem de Brasília restaurada, a área urbana, com seu arruamento, fica melhor realçada e mais fácil de perceber a orientação das ruas. Vale lembrar que a restauração da banda pancromática para esta área de estudo foi de 15 para 10 metros. A restauração da banda pancromática da imagem de Brasília foi a que melhor evidenciou os bons resultados do filtro de restauração.

Diferença de Imagens

As Figuras 6.30 e 6.31 apresentam as imagens diferença desta área de estudo, para as bandas 4 e pancromática, respectivamente.

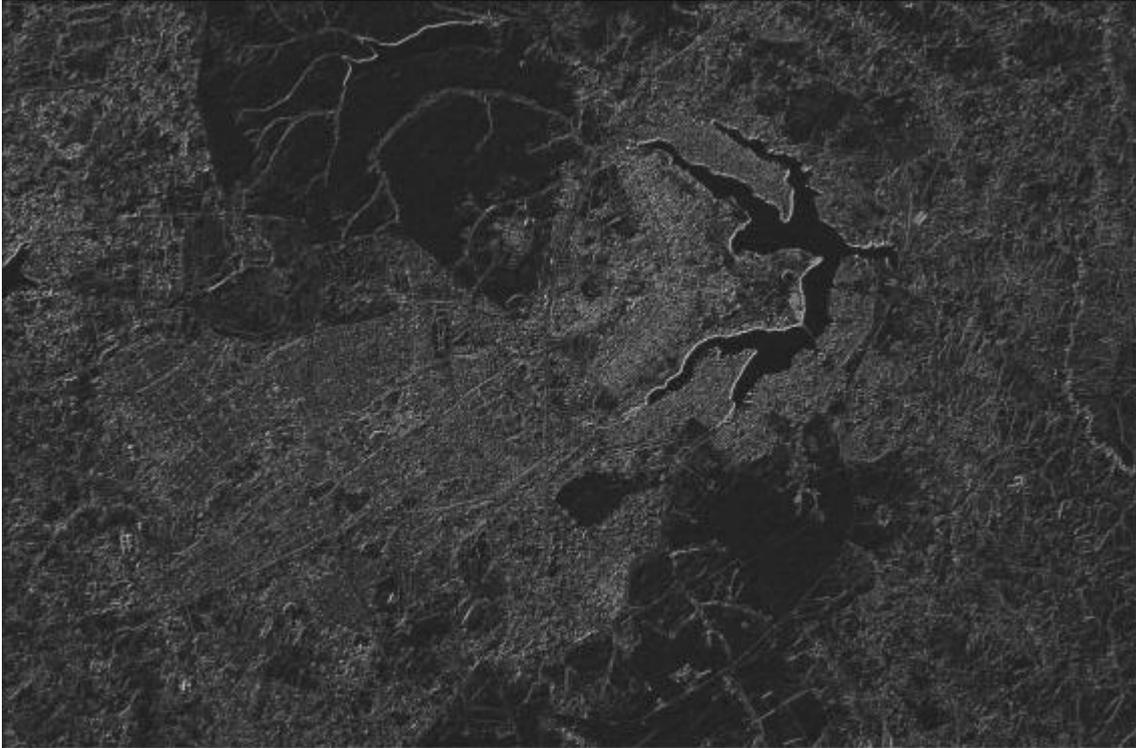


FIGURA 6.30 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 4.

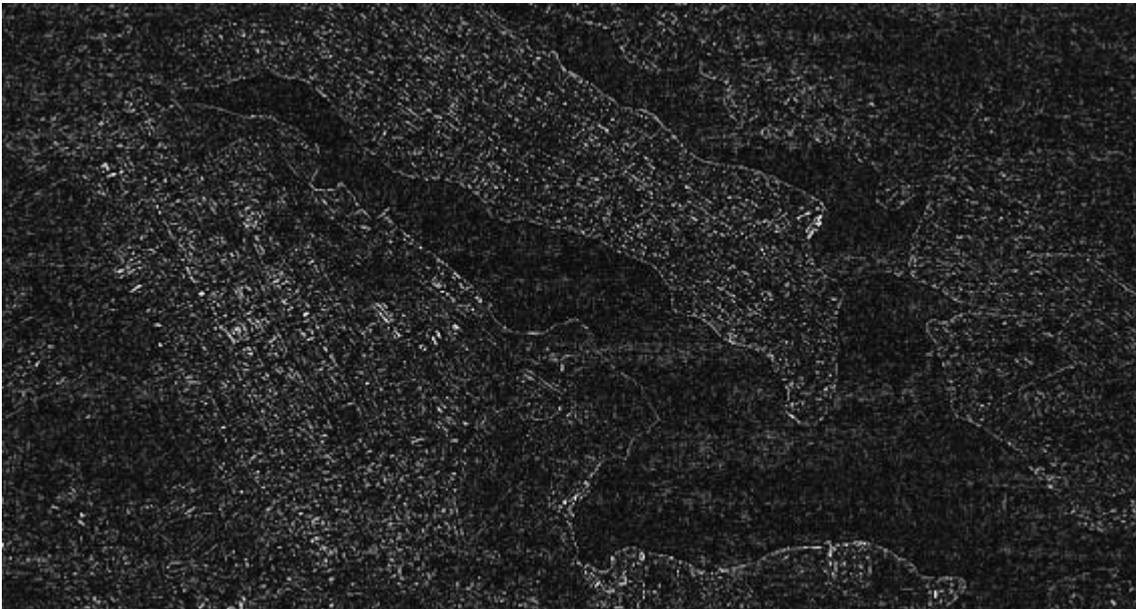


FIGURA 6.31 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.

Quanto mais próximos de zero (preto), maior a semelhança entre a imagem restaurada e a imagem interpolada. Em outras palavras, caso haja grande

diferença nos níveis de cinza entre as duas imagens, a imagem diferença conterá grande quantidade de feições que estão presentes em uma imagem e não estarão presentes na outra. O resultado mostra, mais uma vez, que as principais diferenças ocorrem nas bordas e feições lineares.

Estatística

As medidas estatísticas são apresentadas na Tabela 6.3. A diferença entre as variâncias das imagens restauradas e interpoladas (bandas espectrais) está em torno 14% e da banda pancromática restaurada e interpolada, 25%

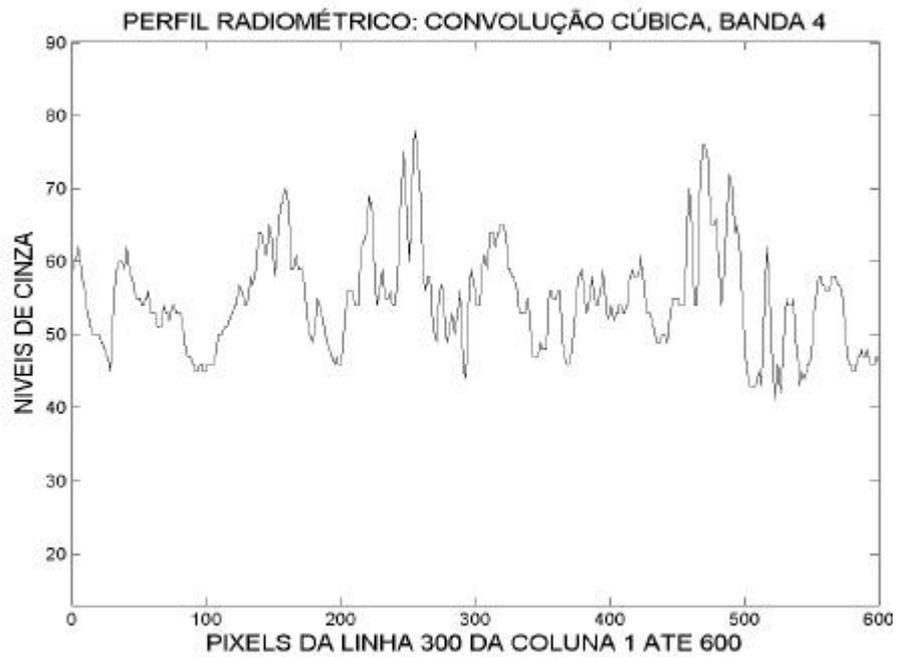
Perfil Radiométrico

As Figuras 6.32 e 6.33 mostram os perfis radiométricos das bandas 4 e pan, ambas interpoladas e restauradas, em uma dada linha das imagens.

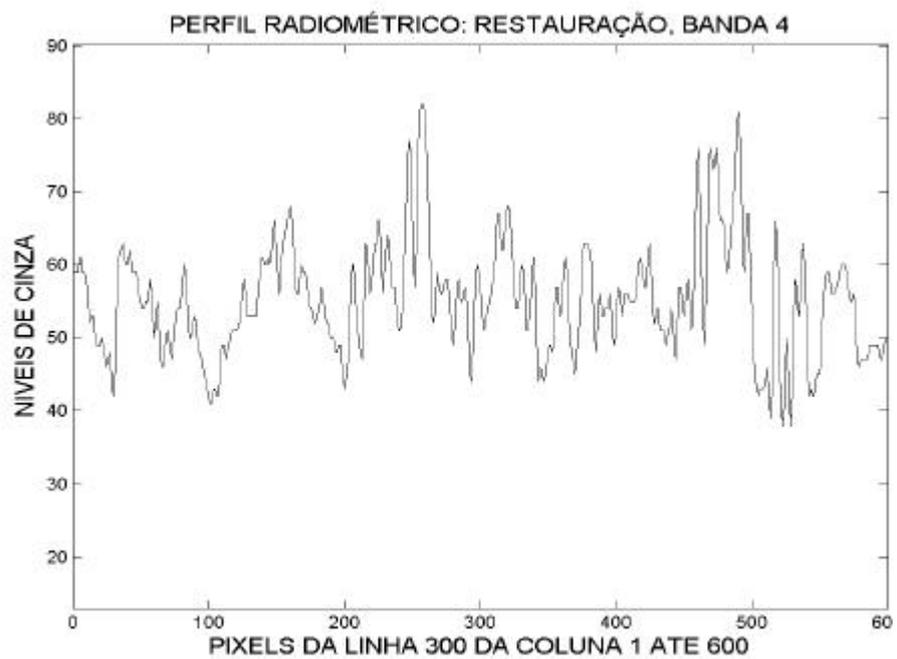
O que este perfil sugere é que, o filtro de restauração teve um maior efeito sobre a imagem pancromática, já que existe uma relação maior de variação do perfil mais freqüente nesta imagem do que na imagem da banda 4.

Tabela 6.3 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo II – Brasília/DF.

Bandas	Método	Variância
Banda 3	Original	278,89
	Convolução Cúbica	268,3044
	Restauração	303,4564
Banda 4	Original	89,8704
	Convolução Cúbica	86,6761
	Restauração	98,4064
Banda 5	Original	428,9041
	Convolução Cúbica	409,2529
	Restauração	472,1929
Banda Pan	Original	70,8964
	Convolução Cúbica	68,3929
	Restauração	95,8441



(a)



(b)

FIGURA 6.32 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 4.
(a) Interpolada, (b) Restaurada.

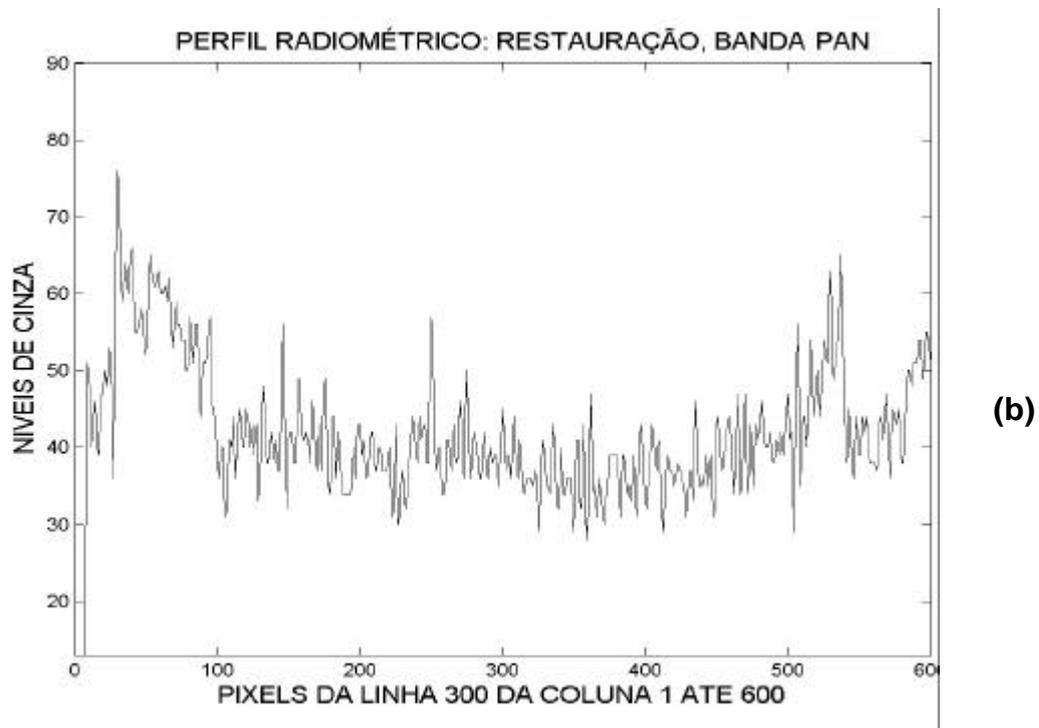


FIGURA 6.33 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática.
(a) Interpolada, (b) Restaurada.

6.4 Área de Estudo III: Vale do Paraíba/SP

Qualidade Visual

Neste experimento, foram utilizadas imagens da região que compreende o Vale do Paraíba/SP, adquiridas no dia 19 de agosto de 2002. As bandas 3, 4 e 5 foram reamostradas para 10 metros utilizando o filtro de restauração desenvolvido e a interpolação por Convolução Cúbica. A banda pancromática foi reamostrada para 5 metros.

A Figura 6.34 mostra a área do Vale do Paraíba escolhida para a análise e as Figuras 6.35 e 6.36 correspondem às imagens interpoladas e restauradas da área escolhida, para a banda 3.

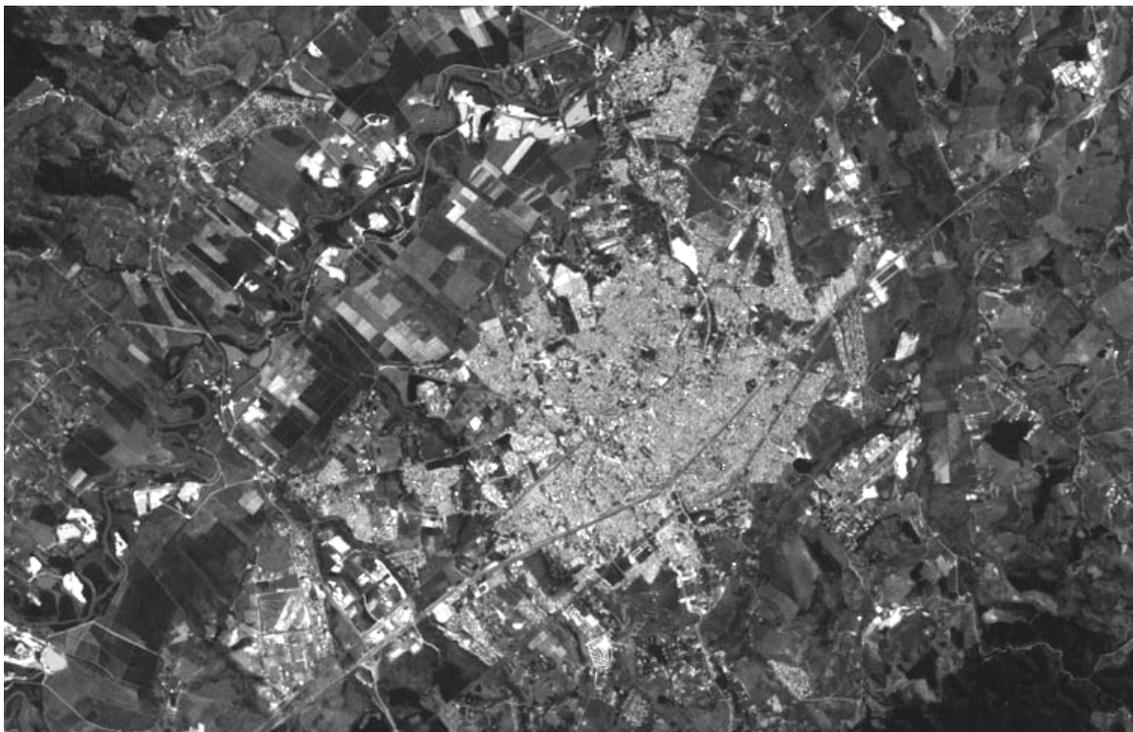


FIGURA 6.34 - Imagem original Vale do Paraíba/SP, banda 3, pixel = 30m.



FIGURA 6.35 - Imagem interpolada por ICC, banda 3, pixel = 10 m.



FIGURA 6.36 - Imagem restaurada, banda3, pixel = 10 m.

Mais uma vez é possível perceber a melhor definição da imagem restaurada, como é apresentada na Figura 6.36, em especial, nesta área de estudo que possui muitas feições.

As Figuras 6.37, 6.38 e 6.39 mostram uma composição colorida (3B, 4G, 5R) realizada com as imagens originais, interpoladas e restauradas respectivamente.

Os resultados são ainda mais evidentes, tendo em vista que as imagens foram restauradas para 10 metros (triplo da taxa de amostragem). Na imagem restaurada (Figura 6.39) o contorno do rio e o arruamento da cidade ficam mais realçados.

Nas imagens do Vale do Paraíba se percebe a diferença clara não só na comparação entre as imagens interpoladas e restauradas como quando as restauradas são comparadas com as imagens originais. O ganho “espacial” fica bem visível nos contornos (bordas). Quando é realizada a composição colorida o efeito é ainda mais evidente.



FIGURA 6.37 - Composição colorida com imagens originais, (3B, 4G, 5R) com pixel = 30 m.



FIGURA 6.38 - Composição colorida com imagens interpoladas por convolução cúbica, (3B, 4G, 5R) com pixel = 10 m.



FIGURA 6.39 - Composição colorida com imagens restauradas, (3B, 4G, 5R) com pixel = 10 m.

O experimento realizado para a banda pancromática é apresentado na seqüência de Figuras de 6.40 a 6.42.

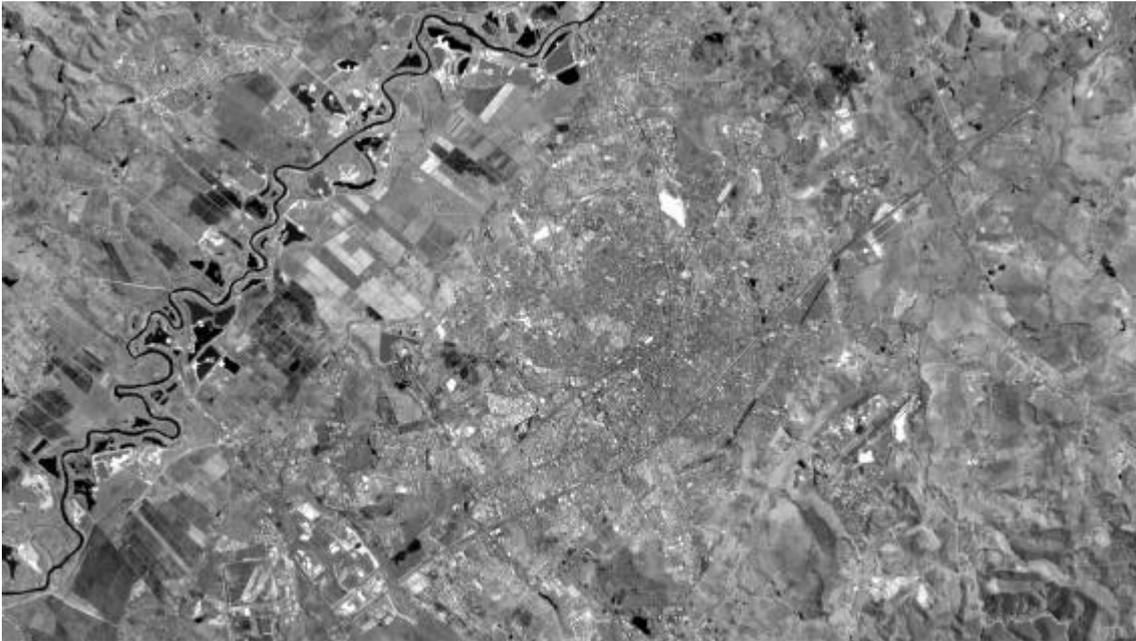


FIGURA 6.40 - Imagem original, banda pancromática, pixel = 15 m.



FIGURA 6.41 - Imagem interpolada por ICC, banda pancromática, pixel = 5 m.



FIGURA 6.42 - Imagem restaurada, banda pancromática, pixel = 5 m.

Para este experimento com a banda pancromática, o que se nota, é que o resultado da restauração não ficou tão bom. Percebe-se o aparecimento de pequenas listras na imagem que são amplificações das altas frequências, causado pelo alto valor

Diferença de Imagens

As Figuras 6.43 e 6.45 apresentam as imagens diferença desta área de estudo, para as bandas 3 e pancromática respectivamente.

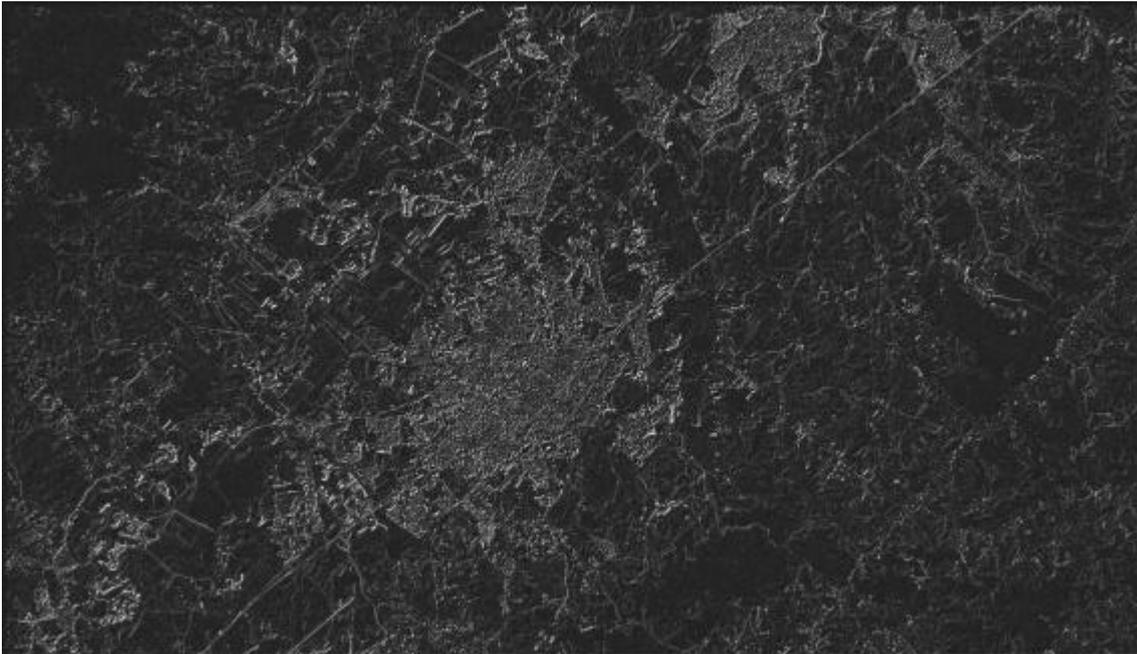


FIGURA 6.43 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda 3.

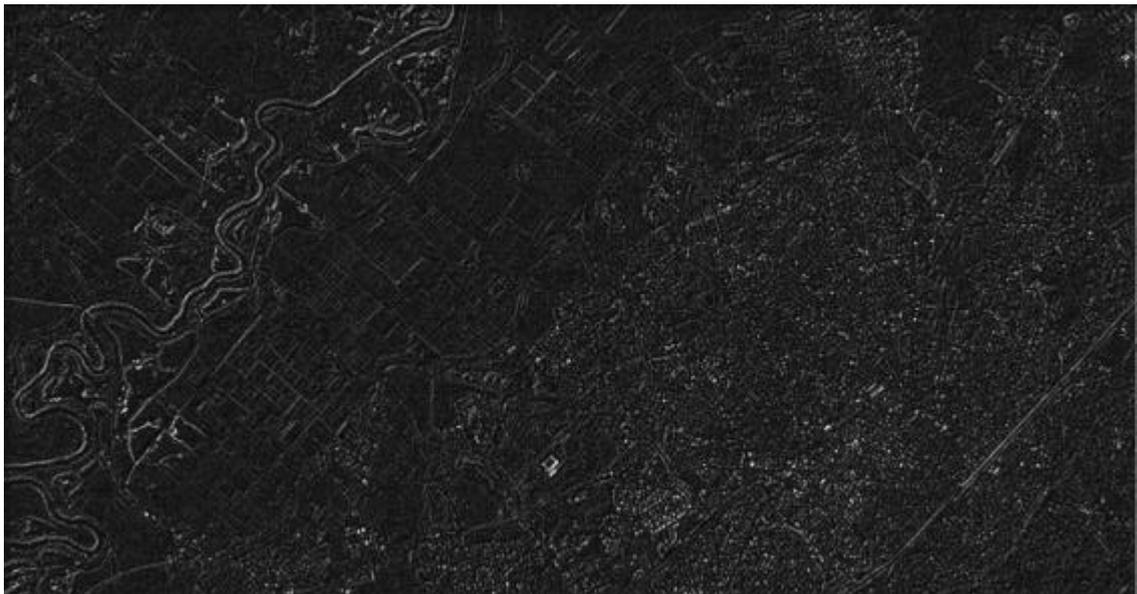


FIGURA 6.44 - Imagem diferença (restaurada – interpolada). Banda Pan.

Na imagem diferença desta área de estudo, o que mais se destaca é a Via Dutra na banda 3 e os silos da Petrobrás na banda pancromática. São visíveis também, diversos pontos espalhados em toda a imagem diferença da banda

pancromática, que caracterizam de feições presentes na imagem restaurada e ausentes na imagem interpolada.

Estatística

Os resultados obtidos no teste de medidas estatísticas são apresentados na Tabela 6.4. A diferença entre as variâncias das imagens restauradas e interpoladas (bandas espectrais) está em torno de 19%, e da banda pancromática restaurada e interpolada, 20%.

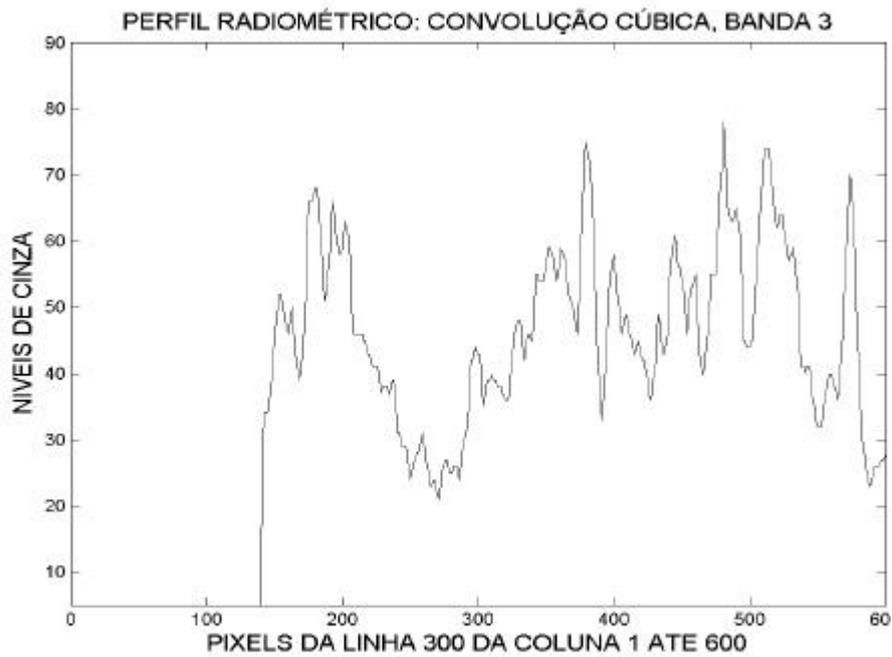
TABELA 6.4 - Estatística das imagens originais, interpoladas e restauradas para a Área de estudo III – Vale do Paraíba/SP.

Bandas	Método	Variância
Banda 3	Original	325,0809
	Convolução Cúbica	311,1696
	Restauração	369,7929
Banda 4	Original	381,4209
	Convolução Cúbica	360,6201
	Restauração	465,2649
Banda 5	Original	852,0561
	Convolução Cúbica	807,1281
	Restauração	990,3609
Banda Pan	Original	97,8121
	Convolução Cúbica	94,4784
	Restauração	118,81

Perfil Radiométrico

As Figuras 6.45 e 6.46 mostram os perfis radiométricos das bandas 3 e pan, ambas interpoladas e restauradas.

O que mais se destaca na análise do perfil radiométrico é o efeito do filtro de restauração na banda pancromática. As variações muito bruscas nos levam a concluir, que a imagem ficou com um aspecto ruidoso, com alta variação nos tons de cinza.

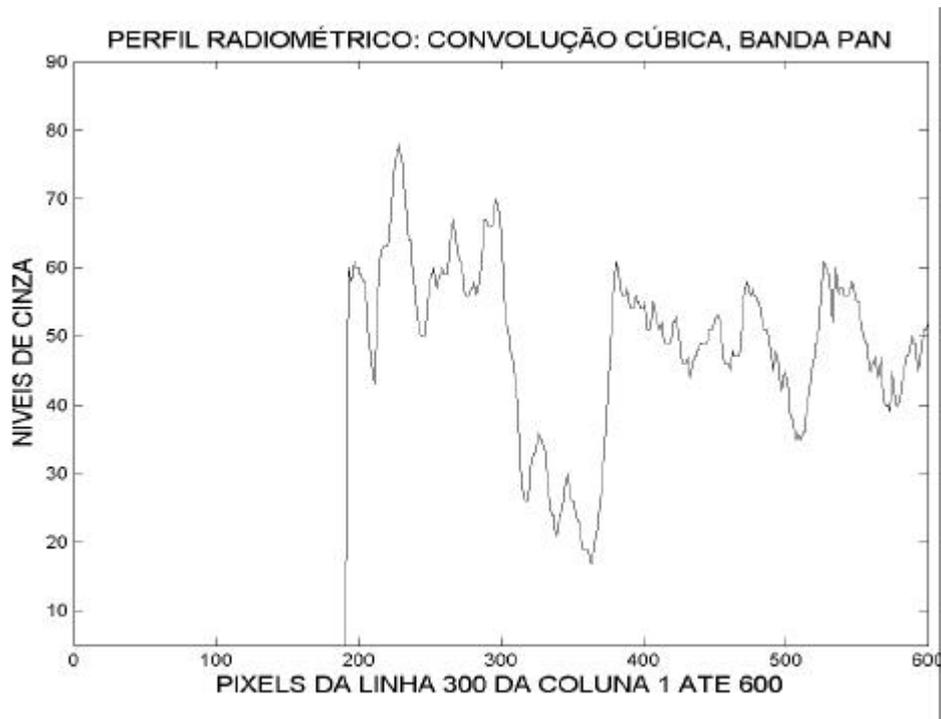


(a)



(b)

FIGURA 6.45 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda 3.
(a) Interpolada, (b) Restaurada.



(a)



(b)

FIGURA 6.46 - Perfil Radiométrico da linha 300 da banda pancromática (a) Interpolada, (b) Restaurada.

6.5 Análise dos Resultados

De um modo geral, o método de restauração aplicado para reamostrar imagens do ETM+ obteve melhor desempenho do que o método de convolução cúbica em todos os testes realizados. Este desempenho já era esperado, já que o principal parâmetro de comparação é a análise visual. Com as transições entre pixels mais agudas, a imagem restaurada apresenta um realce maior. Diferentemente, na convolução cúbica que se comporta como um filtro passa-baixas, as altas freqüências responsáveis pelos detalhes são atenuadas o que faz com que as imagens apresentem um aspecto mais suavizado.

As Figuras 6.47 e 6.48 apresentam as respostas do sistema modificado pelo filtro de restauração comparadas com a resposta do sensor ETM+ para as bandas 3 e pan respectivamente.

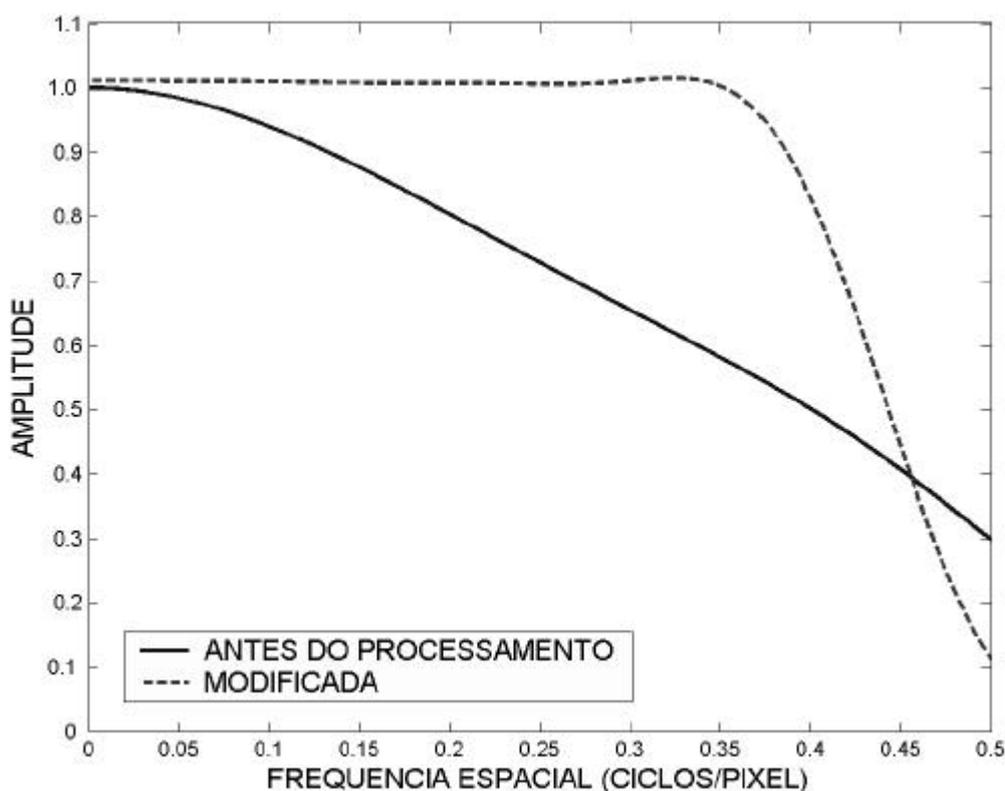


FIGURA 6.47 - Resposta do ETM+ (banda 3) modificada pelo filtro de restauração.

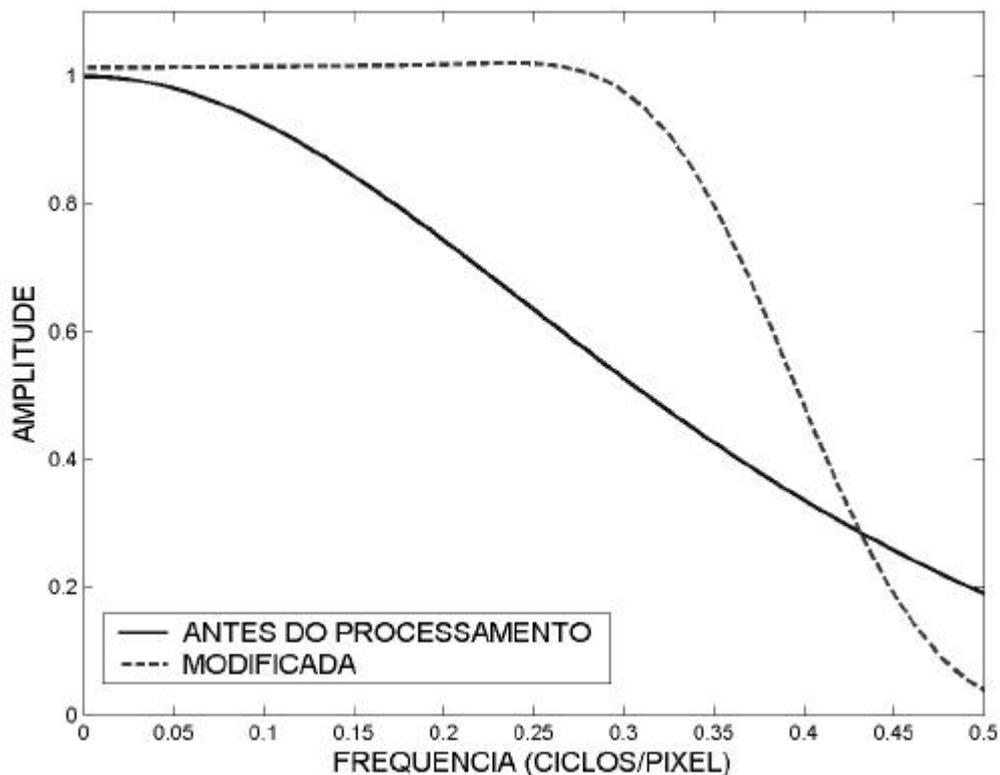


FIGURA 6.48 - Resposta do ETM+ (banda pancromática) modificada pelo filtro de restauração.

Através destes gráficos é possível determinar os novos valores de EIFOV, os quais são apresentados na Tabelas 6.5. Estes valores, quando comparados aos valores de EIFOVs, calculados antes do processamento, indicam uma melhoria na resolução espacial efetiva da imagem. Pode-se observar que, a melhoria foi maior na direção de varredura do espelho, que apresentava uma maior perda de resolução.

TABELA 6.5 - Valores de EIFOV após o processamento para o ETM+. Método teórico apoiado em dados experimentais.

Bandas	EIFOV (X) Antes do processamento	EIFOV (Y) Antes do processamento	EIFOV (X) modificado	EIFOV (Y) modificado
Banda 1	35,35	31,25	33,09	30,92
Banda 2	36,15	33,10	33,46	31,96
Banda 3	37,40	33,42	33,6	32,01
Banda 4	39,16	34,74	34,61	32,63
Banda 5	34,56	34,74	32,77	32,63
Banda 7	33,40	31,13	32,40	30,90
PAN	23,94	21,03	18,84	18,23

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação do desempenho do sensor ETM+ em termos da resolução espacial e a implementação de filtros de restauração destas imagens através da técnica de filtragem inversa modificada. A técnica de restauração utilizada neste trabalho é uma adaptação do trabalho realizado por Fonseca et al. (1993) para a restauração de imagens do sensor TM do Landsat-5. As principais contribuições deste trabalho são: o estudo e a avaliação da função de transferência de modulação do sensor ETM+ e a disponibilização para a comunidade de sensoriamento remoto, de um software para restauração de imagens ETM+ do Landsat-7. A determinação das FTMs do sensor ETM+ é realizada através de dois modelos: (1) modelo de pré-lançamento, utilizando especificações de projeto do sensor e (2) modelo baseado em um alvo natural (ponte) na imagem proposto por Storey (2001). Para o projeto do filtro de restauração foram utilizados os resultados do segundo método.

Na avaliação apresentada no capítulo 6 pode-se observar que as imagens do sensor ETM+ do Landsat-7 reamostradas com o filtro de restauração apresentaram melhores resultados do que as imagens reamostradas com o interpolador convencional de Convolução Cúbica (ICC), como já era esperado. Esta melhoria é mais notável em feições lineares, tais como pontes, pistas de aeroportos, ruas e etc., que geralmente, são feições de interesse em algumas aplicações tais como em estudos urbanos.

Poderia-se argumentar que a imagem interpolada pelo ICC poderia ser realçada através de um filtro de realce e, assim, após este processamento, a imagem apresentar resultados comparáveis à imagem restaurada. Embora isto seja factível, a vantagem de se utilizar o filtro de restauração combinado com o interpolador é a redução no custo computacional, onde as operações de realce

e interpolação são realizadas em uma única operação. Além disso, o filtro de restauração é projetado usando a informação do sensor (FTM) para calcular os seus coeficientes, o que resulta em uma melhor estimativa dos valores de radiometria dos pixels em relação aos interpoladores tradicionais que basicamente usam um critério de média.

A melhoria da resolução espacial efetiva fica evidente nos testes realizados. A qualidade visual das imagens mostra que a imagem restaurada pode ser uma boa alternativa para trabalhos que requerem uma análise mais detalhada de alvos quando não se tem disponível imagens de melhor resolução. Imagens restauradas em uma escala maior têm sido usadas por alguns pesquisadores do INPE para realizar trabalhos de campos assim como em outras aplicações.

Como sugestão para trabalhos posteriores, propomos os seguintes estudos:

- determinação da FTM de outros sensores tais como CBERS, MODIS, etc, para a restauração destas imagens ;
- fusão de imagens restauradas do Landsat-7, em especial a pancromática, com imagens de outros sensores utilizando diversos métodos (IHS, Wavelet);
- comparação de outros métodos de restauração com o método implementado neste trabalho;
- simulação de bandas pancromáticas a partir de imagens restauradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, H. C; Hunt, B. R. **Digital image restoration**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, New Jersey, 1977.
- Anil, K.J. **Fundamental of digital image processing**. Englewood Cliffs -New Jersey: Prentice-hall information and system sciences series, 1989.
- Arguello, R. J.; Sellner, H. R.; Stuller, J. A. Transfer Function compensation of sampled imaging. **IEEE Transactions on Computers**, v. 21, n. 7, p. 812-818, July, 1972.
- Boult, T.; Wolberg, G. Local Image Reconstruction and Subpixel Restoration Algorithms , **CVGIP: Graphical Models and Image Processing**, v. 55, n. 1, p. 63-77, Jan. 1993.
- Bumbaca, F.; Smith, K. C. A Practical Approach to Image Restoration for Computer Vision. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 42, n. 2 ,p. 220-233, 1988.
- Câmara Neto, G.; Mascarenhas, N.D.A. Methods for Image Interpolation through F.I.R. Filter Design Techniques. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Boston, MA, Apr. 14-16, 1983, **Proceeding**. Boston: IEEE, p. 391- 394. (INPE-2653-PRE/259).
- Carnahan, W. H.; Zhou, G. Fourier Transform techniques for the evaluation of the Thematic Mapper line spread function. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 5, p. 639-648, May 1986.
- Carvalho, M.; Gherardi, D.F.M. Uso de transformação IHS e classificação não supervisionada por regiões para o mapeamento da sensibilidade ambiental o derramamento de óleo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 05 -10 abr. 2003, Belo Horizonte, Brasil, **Anais...**, São José dos Campos: INPE. Seção de Painéis. Disponível em: <http://lagavulin.ltid.inpe.br:1905/col/dpi.inpe.br/lise/2002/03.25.17.22.28/doc/mirror.cgi>> Acesso em: maio 2003.
- Earth Science Division and ECF Information. (ESDECFI.); **LANDSAT**. Disponível em: <http://www.espo.nasa.gov/project/satellite.html>>. Acesso em: abril, 2003.
- Ekstrom, M.P. **Digital image processing techniques**. Orlando : Academic, 1984.

- Fonseca, L. M. G.; Prasad, G. S. S. D.; Mascarenhas, N. D. A. Combined interpolation-restoration of landsat images through fir filter design techniques. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 2547-2561, Jan. 1993.
- Fonseca, L.M.G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR**. São José dos Campos. 148 p.(INPE-6628-TAE/30). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1988.
- Gherardi, D. F. M.; Braga, C. Z. F.; Eichenberger, C. Utilização de imagens TM Landsat para o mapeamento do índice de vulnerabilidade ambiental ao impacto por óleo da zona costeira entre Rio Grande do Norte e Ceará, Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...**, São Paulo, Fábrica da Imagem, 2001. Seção de Painéis. CD-ROM.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E., **Processamento de imagens digitais**, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2000.
- Guan, L.; Ward, R.K., Restoration of Randomly Blurred Images by the Wiener Filter, **IEEE Trans. Acous., Speech & Signal Processing**, v. 37, n. 7, p. 589-592. April, 1989.
- Hunt, B. R. "Image Restoration", in M. P. Ekstrom, ed., **Digital image processing techniques**. New York: Academic, 1984, p. 53-76.
- Katsaggelos, A.K. **Digital image restoration**. Chicago: Springer-Verlag, 1989. 243 p.
- Kepler, S. O. F. **Fundamentos de radiodiagnóstico por imagem**. [on line]. <<http://www.if.ufrgs.br/ast/med/imagens/index.htm>>. Acesso em: fevereiro, 2001.
- Mather,P.M. **Computer processing of remotely-sensed images**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 293p.
- Markham, B. L., The Landsat sensors' spatial responses. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 23, n. 6, p. 864-875, Nov. 1985.
- Mascarenhas, N.D.A.; Velasco, F.R.D. **Processamento digital de imagens**. IV Escola de Computação, IME/São Paulo, SP, 1984. 235 p.

- Miranda , A. A. Metodologia que procura mejorar la resolucio n efectiva en imagenes satelitarias, para la actualizacio n del plan estrategico del ciudad de Quito, Ecuador. In: Curso Internacional em Sensoriamento Remoto, 14., 2000, São José dos Campos, Brasil, **Trabalho final...**, São José dos Campos: INPE.
- Moreira, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicaco**. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center (GSFC). **Landsat 7 System Specification**. Revision, 430-L-000-2. November 1996.
- Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicaco**es. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 308 p.
- Oakdale Engineering. **DATAFIT 8.0**. Disponível em: <<http://www.curvefitting.com/>>. Acesso em: agosto, 2002.
- Oliveira, J.R. **Efeito da forma do detector na capacidade de informaco de um canal de imagens**. São José dos Campos: INPE, 1975. (INPE-701-TPT/006)
- Oppenheim, A.V.; Schafer, R. **Digital signal processing**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.
- Park, S. K., Schowengerdt, R., Kaczynski, M., Modulation-transfer-function analysis for sampled imaging systems. **Applied Optics**, v. 23, n.15, p. 2572-2582, Aug. 1984.
- Pham, T. D. An image restoration by fusion. **Pattern Recognition**, v.34, n. 12, p. 2403-2411. Dec. 2001.
- Rabiner, L.R.; Gold, B. **Theory and application of digital signal processing**. Englewood Cliffs: Prentice-Hal, 1975.
- Reichenbach, S. E.; Rahman, Z. ; Narayanswamy, R. Transform-Coding Image Compression for Information Efficiency and Restoration. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 4, n. 3, p. 215-224, 1993.
- Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis**. an introduction. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 1993.
- Rosenfeld, A.; Kak, A. C. **Digital picture processing**. New York, N. Y.: Academic, 1982.

- Schowengerdt, R. A., Archwamety, C., C. Wrigley, R. Landsat Thematic Mapper image-derived MTF. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 9, p. 1395-1406, Sept. 1985.
- Schowengerdt, R.A. **Remote Sensing: models and methods for image processing**. New York: Academic Press, 1997. 523p.
- Schutten, R.W.; Vermeij, G.F. The approximation of image blur restoration filters by finite impulse responses. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 2, n. 2, p. 176-180, Mar. 1980.
- Sellner, H. R. **Transfer function compensation of sampled imagery. A symposium on sampled images**. Norwalk, Connecticut, Perkin-Elmer, 1971.
- Simi R; Simi Junior, R.; Rech, J. V.; Anjos, F. A. dos. Avaliação Ambiental da Porção Sul de Balneário Camboriú em Santa Catarina, através de Imagens Orbitais, em escalas 1:20.000 e 1:10.000, para fins de Planejamento Territorial Costeiro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 05 -10 abr. 2003, Belo Horizonte, Brasil, **Anais...**, São José dos Campos: INPE, p. 603-609. CD-ROM.
- Starck, J.-L.; Murtagh, F.; Bijaoui, A. Multiresolution support applied to image filtering and restoration. **Graphical Models and Image Processing**, v. 57, n. 5, p. 420-431, 1995.
- Storey, J. C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation. In: Fujisada, H; Lurie, J. B.; Weber, K., ed. **Sensors, systems, and next-generation satellites V**. Bellingham, Washington: SPIE, 2001. p. 50-61 (Proc. SPIE Vol. 4540).
- Storey, J. C. **Parâmetros para o cálculo da função de transferência de modulação do Landsat-7**. US Geological Survey EROS Data Ctr./Raytheon Technical Services. Comunicação pessoal, mar, 2003.
- Trolltech. **Crossplatform C++ GUI framework**. Disponível em: <http://www.trolltech.com/>. Acesso em: Outubro, 2002.
- Zhou, Y. T.; Chellappa, R. ; Vaid, A. and Jenkins, B. K. Image restoration using a neural network. **IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing**, ASSP-v. 36, n. 7, p. 1141-1151, 1988.