

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**PÁGINA DINÂMICA PARA APRENDIZADO DO
SENSORIAMENTO REMOTO**

LEONARDO MONTEIRO BRYS

Orientador: Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

Porto Alegre (RS), Abril de 2008

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto como requisito
Para obtenção do Título de Mestre

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SENSORIAMENTO REMOTO

**PÁGINA DINÂMICA PARA APRENDIZADO DO
SENSORIAMENTO REMOTO**

Leonardo Monteiro Brys

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, na Área de Concentração Desenvolvimento de Metodologias em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Porto Alegre – RS, Brasil
Abril de 2008

PÁGINA DINÂMICA PARA APRENDIZADO DO SENSORIAMENTO REMOTO¹

Autor: Leonardo Monteiro Brys
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Brys, Leonardo Monteiro
Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto. /
Leonardo Monteiro Brys. - Porto Alegre : UFRGS/CEPSRM, 2008.
[172 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do
Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e
Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.
Porto Alegre, RS - BR, 2008.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Processamento Digital de Imagens. 3.
Páginas Dinâmicas. 4. Educação à Distância. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

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

Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Orientador/CEPSRM, Porto Alegre-RS

Dr. Francisco Humberto Simões Magro

Membro da Banca/UFGRS, Porto Alegre-RS

Dr. Marcelo Tomio Matsuoka

Membro da Banca/UFRGS, Porto Alegre-RS

Ph.D. Vitor F. A. Haertel

Membro da Banca/CEPSRM, Porto Alegre-RS

Candidato: Leonardo Monteiro Brys

Porto Alegre, 14 de abril de 2008

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores e funcionários do Centro de Sensoriamento Remoto pelo apoio e ensinamentos.

Ao pessoal do CPTEC-INPE de Cachoeira Paulista, em especial ao Fabiano e à Cíntia, pela ótima hospitalidade e dicas que mudaram a forma de construção da página.

PÁGINA DINÂMICA PARA APRENDIZADO DO SENSORIAMENTO REMOTO¹

Autor: Leonardo Monteiro Brys
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

SINOPSE

Nesta dissertação será apresentada uma alternativa para o aprendizado do sensoriamento remoto através de uma página *web*, a qual pode ser utilizada como ferramenta de apoio às disciplinas regulares ou como material de pesquisa. Através da integração das linguagens de programação C e PHP, algumas das principais técnicas de processamento digital de imagens (PDI) são disponibilizadas via *web* juntamente com a explicação dos algoritmos, fórmulas e métodos utilizados, bem como é disponibilizado o material teórico sobre o assunto.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, (172 p.), Abril de 2008.

PÁGINA DINÂMICA PARA APRENDIZADO DO SENSORIAMENTO REMOTO¹

Autor: Leonardo Monteiro Brys
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

ABSTRACT

This Dissertation will be presented an alternative to the learning of remote sensing through a web page, which can be used as a tool to support regular disciplines or as material for research. Through the programming integration of the languages C and PHP, some of the main techniques for the processing of digital images (PDI) are available through the web as well as the algorithms explanation, formulas, used methods and the theoretical material on the subject.

¹ Master of Science Thesis, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Graduate Course in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, (172 p.) – April, 2008.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Etiquetas mais utilizadas do formato TIFF.	35
Tabela 2: Formatos preferenciais de softwares comerciais.	36
Tabela 3: Métodos de reamostragem.	62
Tabela 4: Comparação dos valores dos histogramas gerados pela PDASR e MultiSpec.....	127
Tabela 5: Comparação dos CD's dos histogramas PDASR e ENVI.	130
Tabela 6: Comparação dos CD's dos 10 primeiros pixel das imagens resultantes da Equalização do histograma: SPRING e PDASR.....	135
Tabela 7: Comparação dos CD's dos 10 primeiros pixels das imagens resultantes do Stretch Linear: ENVI e PDASR.....	139
Tabela 8: Comparação dos contadores digitais de 20 pixels entre a imagem original e as imagens resultantes da transformação HSV=>RGB da PDASR e do ENVI. .	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Flutuações dos campos elétrico e magnético de uma onda. Fonte: NOVO (1989). .5	
Figura 2: Espectro Eletromagnético. Fonte: FIGUEIREDO (2005).....6	
Figura 3: Curva espectral da vegetação, da água e do solo. Fonte: FLORENZANO (2002)... 8	
Figura 4: Espectro dos comprimentos de onda da luz visível. Fonte: SOUTO (2000) 9	
Figura 5: Diagrama de cromaticidade do CIE. Fonte SOUTO (2000) 9	
Figura 6: Círculos representando as cores primárias e secundárias do sistema aditivo, onde as interseções indicam a cor resultante da soma entre as cores dos círculos correspondentes. Fonte: ENVI (2000) 10	
Figura 7: Cubo representando o espaço de cores RGB. 11	
Figura 8: Hexágono representando o modelo de cores HSV. Fonte: ENVI (2000) 13	
Figura 9: Modelo de pirâmide duplo-hexacônica representando o modelo de cores HSL. Fonte: ENVI (2000)..... 17	
Figura 10: Gráficos relativos aos experimentos (a) e (b). Fonte: SOUTO (2000) 19	
Figura 11: (a) imagem digital com grupo de pixels selecionados; (b) zoom da janela de 9x9 pixels; (c) valor dos contadores digitais da função $f(x, y)$ 21	
Figura 12: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 3, 4 e 5, com as cores azul, verde e vermelho. Fonte: FLORENZANO (2002).... 23	
Figura 13: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 3, 4 e 5, com as cores azul, vermelho e verde. Fonte: FLORENZANO (2002).... 23	
Figura 14: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 1, 2 e 3, com as cores azul, verde e vermelho. Fonte: FLORENZANO (2002).... 23	
Figura 15: Vizinhança 4 de um pixel..... 24	
Figura 16: Vizinhança 8 de um pixel..... 24	
Figura 17: Estrutura do arquivo PNG. Fonte: RAMOS (2000)..... 28	
Figura 18: Estrutura do arquivo Bitmap. Fonte: RAMOS (2000)..... 29	
Figura 19: Estrutura do arquivo <i>TIFF</i> . Fonte: VASCONCELOS (2002) 30	
Figura 20: Estrutura do cabeçalho do arquivo <i>TIFF</i> . Fonte: VASCONCELOS (2002)..... 31	
Figura 21: Exemplo de grid de uma imagem, estruturada em Colunas x Linhas. Fonte: VASCONCELOS (2002) 32	
Figura 22: Estrutura do segmento IFD do arquivo <i>TIFF</i> . Fonte: VASCONCELOS (2002) .33	
Figura 23: Estrutura de uma Etiqueta do arquivo <i>TIFF</i> . Fonte: VASCONCELOS (2002) ...33	
Figura 24: IFOV..... 37	

Figura 25: Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais para discriminar áreas urbanas. Fonte: MELO (2002)	38
Figura 26: Espectro Eletromagnético (A) e Resolução espectral (B). Fonte: JENSEN e JACKSON (2001).....	39
Figura 27: Diferença de resolução radiométrica, em área urbana. Fonte: MELO (2002)	40
Figura 28: Composição colorida de uma imagem do sensor ETM+ Landsat 7 dos canais 123 com os respectivos histogramas de cada banda.....	43
Figura 29: Sistemas de coordenadas para a imagem e o mapa, juntamente com a especificação de pontos de controle no terreno. Fonte: adaptada de RICHARDS (1993)	50
Figura 30: Transformação Afim - Paralelismo invariante. Fonte QUEIROZ (2003).....	51
Figura 31: Relação entre os mapeamentos direto e inverso. Fonte: QUEIROZ (2003)	58
Figura 32: O problema da reamostragem: compatibilizar a radiometria da imagem original para uma nova distribuição de pixels. Fonte: BRITO e COELHO (2002).....	61
Figura 33: Interpolação por Convolução Cúbica.....	63
Figura 34: Exemplo de Stretch Linear. Fonte: ENVI (2000)	64
Figura 35: Exemplo de Stretch Raiz Quadrada. Fonte: ENVI (2000)	65
Figura 36: Exemplo de Stretch Quadrado. Fonte: ENVI (2000)	66
Figura 37: Exemplo de Stretch Logaritmo. Fonte: ENVI (2000)	67
Figura 38: Exemplo de Stretch Negativo. Fonte: ENVI (2000)	67
Figura 39: Exemplo de Equalização do histograma. Fonte: ENVI (2000).....	68
Figura 40: As variações de DN ao longo de uma linha de uma imagem (a) podem ser expressa como várias componentes senóides (b), com diferentes amplitudes e frequências. (Fonte: QUEIROZ, 2003, adaptada de DRURY, 1989).	70
Figura 41: Exemplo de uma “máscara” sobre os pixels de uma imagem.....	72
Figura 42: Filtros de suavização.....	72
Figura 43: Filtros de aguçamento.....	73
Figura 44: Filtros de detecção de bordas.....	73
Figura 45: Filtros Direcionais: (a) norte, (b) nordeste, (c) leste, (d) sudeste, (e) sul, (f) sudoeste, (g) oeste e (h) noroeste.....	74
Figura 46: Representação esquemática da seqüência de operações utilizadas na aplicação do filtro de transformada de Fourier. Fonte: CERQUEIRA (1999).....	76
Figura 47: Esquema de composição do vetor de dados para eliminar a descontinuidade entre o primeiro e o último elemento. Fonte: CERQUEIRA (1999).....	77

Figura 48: Rotação dos eixos na transformação RGB - Componentes Principais.....	80
Figura 49: Esquema do funcionamento de uma página web em PHP (Fonte: PHPBRASIL, 2006).....	89
Figura 50: Página principal da PDASR.	92
Figura 51: Página da PDASR com textos sobre a Formação das Cores.....	93
Figura 52: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma.	94
Figura 53: Página web para visualização do histograma.	95
Figura 54: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma acumulado. ...	96
Figura 55: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma equalizado....	97
Figura 56: Página web para visualização do <i>Stretch</i> do histograma.....	99
Figura 57: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Linear do histograma.	100
Figura 58: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Raiz Quadrada do histograma.	101
Figura 59: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Quadrado do histograma.	102
Figura 60: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Logaritmo do histograma.	103
Figura 61: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Negativo do histograma.	104
Figura 62: Página web para aplicação das técnicas de manipulação do histograma diretamente na imagem do usuário.....	105
Figura 63: Diagrama representando o algoritmo para aplicação da Equalização em uma imagem.	107
Figura 64: Diagrama representando o algoritmo para aplicação do Stretch em uma imagem.	109
Figura 65: Página web para aplicação de Matching entre duas Imagens.	110
Figura 66: Diagrama representando o algoritmo para aplicação do Matching entre duas imagens.	112
Figura 67: Página web para transformação entre Sistemas de Cores.	113
Figura 68: Diagrama representando o algoritmo para transformação de uma imagem no espaço RGB para HSV.	114
Figura 69: Módulo de Fusão de Imagens da PDASR.....	115
Figura 70: Diagrama representando o algoritmo para fusão de imagens por	

transformação IHS.....	117
Figura 71 – Módulo da <i>PDASR</i> com a função de georreferenciamento de imagens de SR.	118
Figura 72 – Exemplos de arquivos texto com grupo de 10 coordenadas no sistema original (a) e no sistema de referência (b).....	119
Figura 73 – Diagrama representando o algoritmo para georreferenciamento de imagens. ..	122
Figura 74 - Módulo de Filtragem Digital da <i>PDASR</i>	123
Figura 75 – Diagrama representando o algoritmo para aplicar a filtragem digital em imagens.....	124
Figura 76 – Imagem do sensor LandSat 5 (composição 543) utilizada como imagem teste para geração e manipulação do histograma.....	125
Figura 77 – Comparação entre histogramas dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>ENVI 3.2</i>	126
Figura 78 – Histogramas Acumulados dos canais 543.....	128
Figura 79 – Comparação entre os histogramas equalizados dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>ENVI 3.2</i>	129
Figura 80 – Comparação entre os histogramas dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>ENVI 3.2</i> , após a aplicação de Stretch Linear com valores de CD entre 50 e 150.....	130
Figura 81 – Comparação entre os histogramas Stretch Raiz Quadrada dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>ENVI 3.2</i>	131
Figura 82 – Comparação entre os histogramas Stretch Quadrado dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>SPRING 3.6</i>	132
Figura 83 – Comparação entre os histogramas Stretch Logaritmo dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>SPRING 3.6</i>	133
Figura 84 – Comparação entre os histogramas dos canais 5, 4 e 3: <i>PDASR</i> e <i>SPRING 3.6</i> , após a aplicação de Stretch Negativo com valores de CD entre 50 e 150....	134
Figura 85 – Imagens resultantes da aplicação da Equalização do Histograma no software <i>SPRING</i> e na <i>PDASR</i>	135
Figura 86 – Imagens resultantes da subtração de cada uma das 3 bandas das imagens <i>PDASR</i> e <i>SPRING</i>	136
Figura 87 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Linear no software <i>ENVI</i> e na <i>PDASR</i>	137
Figura 88 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Raiz Quadrada no software <i>ENVI</i> e na <i>PDASR</i>	137
Figura 89 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Quadrado no software <i>SPRING</i> e na <i>PDASR</i>	138

Figura 90 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Logaritmo no software SPRING e na PDASR.....	138
Figura 91 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Negativo (contadores digitais de 50 a 150) no software SPRING e na PDASR.....	139
Figura 92 – Imagens resultantes da subtração de cada uma das 3 bandas das imagens PDASR e ENVI.....	140
Figura 93 – Imagem ETM+ LandSat 5 da região Lagoa Mangueira (RS) utilizada como referência para aplicação do Matching.	141
Figura 94 – Imagens resultantes da aplicação do Matching no software ENVI e na PDASR.	141
Figura 95 – Imagens resultantes da transformação RGB=>HSV no software ENVI e na PDASR.....	142
Figura 96 – Imagem original e imagens resultantes da transformação HSV=>RGB no software ENVI e na PDASR.	143
Figura 97 – Imagens resultantes da subtração de cada uma das 3 bandas das imagens PDASR e ENVI.....	144
Figura 98 – Composição colorida 321 e pancromática do sensor Quick-Bird.	144
Figura 99 – Imagens resultantes da fusão por Cor Normalizada no software ENVI e na PDASR.....	145
Figura 100 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de Suavização na PDASR e no software ENVI.	145
Figura 101 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de aguçamento na PDASR e no software ENVI.....	146
Figura 102 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de detecção de bordas na PDASR e no software ENVI.....	146
Figura 103 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro direcional na PDASR e no software ENVI.	147
Figura 104 – Imagens resultantes da subtração de cada uma das 3 bandas das imagens onde foi aplicado o filtro de detecção de bordas Aguçar na PDASR e no ENVI... ..	147

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO.....	II
FICHA CATALOGRÁFICA.....	III
BANCA EXAMINADORA	IV
AGRADECIMENTOS	V
SINOPSE	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Introdutórias	1
1.2 Justificativa	2
1.3.1 Objetivo Geral.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Estrutura do Trabalho	3
CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 Conceitos Iniciais.....	4
2.1.1 Radiação Eletromagnética	4
2.1.2 O Espectro Eletromagnético	6
2.1.3 Processo de Formação das Cores.....	8
2.1.3.1 Espaço de cores RGB	10
2.1.3.2 Espaço dos Atributos de Cores: Matiz, Saturação e Intensidade.....	12
2.1.3.3 Problemas Inerentes aos Atributos de Cores	19
2.2 Estrutura das Imagens em SR.....	20
2.2.1 Imagens Coloridas em SR	22
2.2.2 Propriedades de um Pixel	24
2.2.3 Formatos de Imagens.....	25
2.2.3.1 Formato GIF	25
2.2.3.2 Formato JPEG.....	26
2.2.3.3 Formato PNG.....	27

2.2.3.4. Formato BMP	28
2.2.3.5 Formato TIFF.....	29
2.2.3.6 Outros formatos específicos.....	36
2.3 Resoluções das imagens em SR.....	37
2.3.1 Resolução Espacial	37
2.3.2 Resolução Espectral	38
2.3.3 Resolução Radiométrica	39
2.3.4 Resolução Temporal	40
2.4 Processamento Digital de Imagens	40
2.4.1 O Histograma de uma Imagem	42
2.4.2 Correções Radiométricas	44
2.4.3 Correções Geométricas	45
2.4.3.1 Registro	46
2.4.3.2 Georreferenciamento	47
2.4.3.2.1 Transformação geométrica	48
2.4.3.2.2 Mapeamento Inverso.....	57
2.4.3.2.3 Reamostragem/Interpolação	58
2.4.4 Realçamento e Suavização de Imagens	63
2.4.4.1 Técnicas de Manipulação de Histogramas.....	63
2.4.4.1.1 Stretch do Histograma	63
2.4.4.1.2 Equalização do Histograma	68
2.4.4.1.3 Matching	69
2.4.4.2 Técnicas Envolvendo uma Vizinhança.....	69
2.4.4.2.1 Filtros no Domínio Espacial	71
2.4.4.2.2 Filtros no Domínio de Fourier	74
2.5 Fusão de Imagens.....	78
2.5.1 IHS	78
2.5.2 Principais Componentes	79
2.5.3 Gram-Schmidt.....	80
2.5.4 Cor Normalizada.....	81
CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	82
3.1 Materiais	82
3.1.1 Programas Computacionais Utilizados.....	82

3.1.2 Linguagens de Programação.....	86
3.1.2.1 Linguagem PHP.....	87
3.1.2.2 Linguagem C.....	90
3.1.3 Formatos de Imagem interpretados.....	91
3.2 Criação da PDASR.....	91
3.2.1 Implementação dos Textos no Ambiente Web.....	92
3.2.2 Implementação dos Algoritmos.....	93
3.2.2.1 Análise e Manipulação de Histogramas.....	93
3.2.2.1.1 Visualização do Histograma.....	94
3.2.2.1.2 Visualização do Histograma Acumulado.....	95
3.2.2.1.3 Visualização do Histograma Equalizado.....	96
3.2.2.1.4 Visualização do Stretch do Histograma.....	98
3.2.2.2 Aplicação das Técnicas de Manipulação do Histograma em Imagens de SR.....	104
3.2.2.2.1 Aplicação de Equalização na Imagem.....	105
3.2.2.2.2 Aplicação de Stretch na Imagem.....	107
3.2.2.2.3 Matching entre 2 Imagens.....	110
3.2.2.3 Transformação entre Sistemas de Cores.....	113
3.2.2.4 Fusão de Imagens.....	114
3.2.2.4.1 Fusão por transformação IHS.....	115
3.2.2.5 Correções Geométricas.....	117
3.2.2.5.1 Georreferenciamento.....	118
3.2.2.6 Filtragem Digital.....	122
CAPÍTULO IV - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	125
4.1 Geração de histogramas.....	125
4.1.1 Histograma da Imagem.....	125
4.1.2 Histograma Acumulado.....	128
4.1.3 Histograma Equalizado.....	129
4.1.4 Histograma Stretch Linear.....	129
4.1.5 Histograma Stretch Raiz Quadrada.....	131
4.1.6 Histograma Stretch Quadrado.....	132
4.1.7 Histograma Stretch Logaritmo.....	132
4.1.8 Histograma Stretch Negativo.....	133
4.2 Aplicação das técnicas de Manipulação de Histogramas em Imagens de SR.....	134

4.2.1 Equalização na Imagem	134
4.2.2 Stretch na Imagem	136
4.2.3 Matching entre duas Imagens	139
4.3 Transformação entre Sistema de Cores	140
4.3.1 Transformação RGB para HSV	141
4.3.2 Transformação HSV para RGB	141
4.4. Fusão de Imagens.....	142
4.5 Filtragem Digital.....	143
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	146
5.1 Conclusões	146
5.2 Recomendações	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Introdutórias

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente em programas que realizem suas operações através das redes de comunicações. O uso da Internet tem sido adotado como auxílio na educação, como ferramenta para auxiliar no ensino, no aprendizado e no trabalho corporativo. A concepção de programas on-line, via Internet, não é uma tarefa fácil de executar. A dificuldade comum dos alunos de graduação, pós-graduação e dos profissionais de outras áreas é a construção de uma solução computacional para os problemas que envolvem a área de Sensoriamento Remoto. Por mais simples que pareça, sempre que for necessária a atualização de uma ferramenta de programação, é necessária a construção do pensamento de forma estruturada (“na forma de um algoritmo”), escrever os algoritmos em uma linguagem de programação (por exemplo, *C*, *Pascal*, *Fortran*), ou usar um ambiente de desenvolvimento para fazer os programas (por exemplo, *Delphi*, *Visual Basic*, *Visual C++*). Na maioria das vezes, para os usuários, um programa ou uma página on-line, onde essas operações fossem realizadas, já seria suficiente. Em alguns países, os órgãos responsáveis por estas informações fornecem ao usuário programas ou páginas web onde é possível realizar tais operações. No Brasil, o órgão responsável é o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que vem iniciando a divulgação de seus produtos através de uma página (*site*) bastante amigável.

A *Internet* (ou *World Wide Web* - Rede Mundial de Computadores) tem se consolidado como grande transmissora de conhecimento, apresentando interatividade com o usuário e facilidades de utilização dificilmente encontradas em outros meios de comunicação. Cada vez mais se evidencia a necessidade da disponibilização da informação. Em especial, nos temas que versam sobre o Sensoriamento Remoto, é possível obter-se na Internet um número muito grande de informações, distribuídas nas mais diversas formas.

A interligação entre a Internet e o Sensoriamento Remoto, mais especificamente as técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), necessita de uma linguagem de programação que possua uma interface atraente e interativa com o usuário, ao mesmo tempo em que permite a realização de operações algébricas/matriciais/interpretação e criação de imagens digitais com grande rapidez (para um grande volume de dados) e tenha condições de

ter seu código-fonte inserido em uma página web. Nestas condições enquadra-se perfeitamente a linguagem PHP (*Hipertext PreProcessor*).

Esta interação será mostrada neste trabalho, através da construção de uma página web contendo informações sobre o tema do Sensoriamento Remoto, além da disponibilização de operações de PDI de maneira on-line.

1.2 Justificativa

A justificativa para a realização deste trabalho é preencher duas lacunas importantes existentes. A primeira é o desenvolvimento de uma página dinâmica para o ensino de Sensoriamento Remoto. A segunda refere-se diretamente as aplicações on-line, onde o usuário tem a possibilidade de manipular as imagens a partir de sua própria estação de trabalho, sendo este um tópico ainda a ser explorado no Brasil. O desenvolvimento de programas, voltados à Internet, traz uma solução surpreendentemente simples e completa para o ensino a distância. Usando-se a linguagem *HTML*, fazendo-se os cálculos e simulações no ambiente, criou-se um sistema de fácil acesso via Internet ou *Intranet*. Esta poderosa ferramenta pode ser usada em EAD (Ensino à Distância), como auxiliar do professor na sala de aula ou até mesmo em ambientes corporativos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A proposta desse trabalho é a criação de um conjunto de ferramentas para processamento digital de imagens na internet. A idéia é disponibilizar a professores, estudantes e demais interessados em Sensoriamento Remoto, ferramentas para internet onde é possível expor conceitos e definições de forma interativa, ao mesmo tempo em que possibilita a direta aplicação das técnicas de PDI, inclusive com a utilização de imagens do próprio usuário, sem que exista a necessidade de instalação de programas na sua estação de trabalho.

1.3.2 Objetivos Específicos

Através da integração entre a linguagem de programação PHP e as técnicas de Processamento Digital de Imagens, a criação da página *web* intitulada **Página Dinâmica** para

Aprendizado do Sensoriamento Remoto (**PDASR**) propõe disponibilizar material para pesquisa e aprendizado do Sensoriamento Remoto, a partir dos seguintes módulos:

- Apresentação de conceitos e definições sobre Sensoriamento Remoto, através de textos dinâmicos;
- Implementação de algoritmos que permitam uma interação com o usuário em operações com imagens orbitais de maneira on-line, sem a necessidade de instalar ou salvar qualquer arquivo na estação de trabalho;
- Diagrama em blocos dos algoritmos implementados, com ilustração da formulação matemática e seqüência de cálculos, a fim de permitir a reprodução, pelo usuário, das operações com imagens em outras linguagens de programação;
- Apresentação das características, vantagens, desvantagens, formas de aquisição e aplicações dos principais sensores e plataformas orbitais;

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos.

No Capítulo I, “**Introdução**” apresenta-se a justificativa para elaboração do trabalho, bem como os objetivos geral e específicos. No Capítulo II, “**Fundamentação Teórica**”, faz-se uma revisão bibliográfica da base teórica referente aos seguintes temas: princípios de sensoriamento remoto, processos de formação de cores, estruturas das imagens em SR, principais técnicas de processamento digital de imagens e das linguagens PHP e C. No Capítulo III, “**Metodologia**”, apresenta-se os softwares e equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada para a realização desta dissertação. No Capítulo IV, “**Análise dos Resultados**”, são mostradas imagens que compõe a página web resultante e as imagens e gráficos resultantes da utilização das aplicações de PDI on-line. No Capítulo V, “**Conclusões e Recomendações**”, seguem as principais conclusões e avaliações das ferramentas disponibilizadas.

CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos Iniciais

O termo Sensoriamento Remoto é definido por Florenzano (2002) como o “conjunto de atividades que permitem a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida”. Ou ainda, por Lillesand & Kiefer (2000) como “... a ciência e arte de receber informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno pela análise dos dados obtidos de uma maneira tal que não haja contato direto com este objeto, esta área ou este fenômeno”.

Para se obter estas informações, usa-se um meio que, neste caso, é a radiação eletromagnética, supondo que esta possa chegar diretamente ao sensor. Isto, no entanto, não é possível em todas as partes do espectro eletromagnético, porque a transmissividade atmosférica é variável para os diversos comprimentos de onda (ENVI, 2000). O grau de transmissão, ou transmissividade, representa a capacidade das ondas eletromagnéticas em penetrarem na atmosfera.

2.1.1 Radiação Eletromagnética

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero absoluto (0 Kelvin). Assim, todo corpo com temperatura absoluta acima de zero pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética. O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre.

A energia eletromagnética não precisa de um meio material para se propagar, sendo definida como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz (300.000 km/s). Dado que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é diretamente proporcional à sua frequência e comprimento de onda, esta pode ser expressa por:

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Onde:

c : velocidade da luz (m/s)

f : frequência (ciclos/s ou Hz)

λ : comprimento de onda (m)

Sob uma perspectiva quântica, a radiação eletromagnética (REM) é concebida como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, enquanto que sob uma perspectiva ondulatória, a REM se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétrico e magnético (NOVO, 1989). A Figura 1 apresenta um esquema da representação dos campos elétrico e magnético e as oscilações mencionadas.

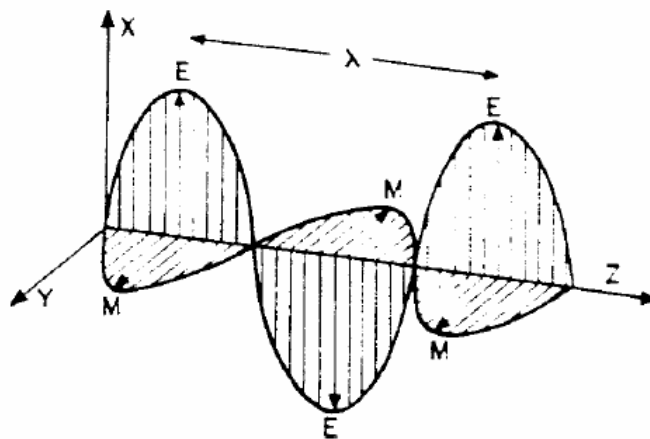


Figura 1: Flutuações dos campos elétrico e magnético de uma onda. Fonte: NOVO (1989).

Onde temos na figura:

E: campo elétrico

M: campo magnético

XZ: plano de excitação do campo elétrico

YZ: plano de excitação do campo magnético

Z: direção de propagação da onda eletromagnética

No modelo ondulatório então a REM é caracterizada em comprimentos de onda que representam a distância entre dois pontos de igual intensidade dos campos elétrico e magnético. O conjunto de comprimentos de onda que compõem a REM é conhecido como *Espectro eletromagnético*.

2.1.2 O Espectro Eletromagnético

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência, sendo esta disposição denominada de “espectro eletromagnético”. Este apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem a energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética (NOVO, 1989). O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de onda muito curtos associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda, como mostra a Figura 2.

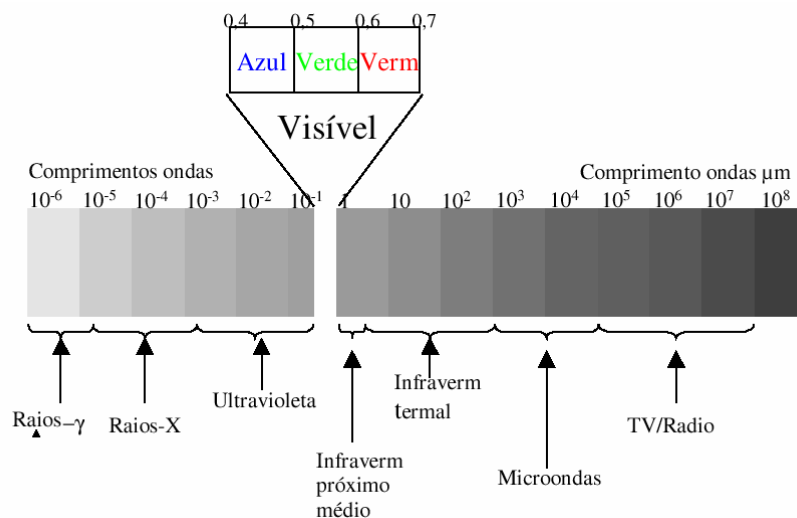


Figura 2: Espectro Eletromagnético. Fonte: FIGUEIREDO (2005).

Em Novo (1989) é apresentada a descrição de cada uma das faixas do espectro eletromagnético.

Radiação Gama (γ): é emitida por materiais radioativos, por ser muito penetrante (alta energia) tem aplicações em medicina (radioterapia) e em processos industriais (radiografia industrial).

Raios X: é produzido através do freamento de elétrons de grande energia eletromagnética.

Ultravioleta (UV): é produzida em grande quantidade pelo Sol, sendo emitida na faixa de $0,003 \mu\text{m}$ até mais ou menos $0,38 \mu\text{m}$.

Visível (luz): é o conjunto de radiações eletromagnéticas que podem ser detectadas pelo sistema visual humano.

Violeta: 0,38 a 0,45 μm

Azul: 0,45 a 0,49 μm

Verde: 0,49 a 0,58 μm

Amarelo: 0,58 a 0,60 μm

Laranja: 0,60 a 0,62 μm

Vermelho: 0,62 a 0,70 μm

Infravermelho (IV): é região do espectro que se estende de 0,7 a 1000 μm e costuma ser dividida em três sub-regiões:

- IV próximo: 0,7 a 1,3 μm

- IV médio: 1,3 a 6 μm

- IV distante: 6 a 1000 μm

Microondas: são radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas eletrônicos (osciladores) e se estendem pela região do espectro de 1 mm até cerca de 1m, o que corresponde ao intervalo de frequência de 300GHz a 300MHz. Os feixes de microondas são emitidos e detectados pelos sistemas de radar (*radio detection and ranging*).

Rádio: é o conjunto de energias de frequência menor que 300Ghz (comprimento de onda maior que 1m).

Os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características bio-físico-químicas. As variações da energia refletida pelos objetos podem ser representadas através de curvas, como as apresentadas na Figura 3.

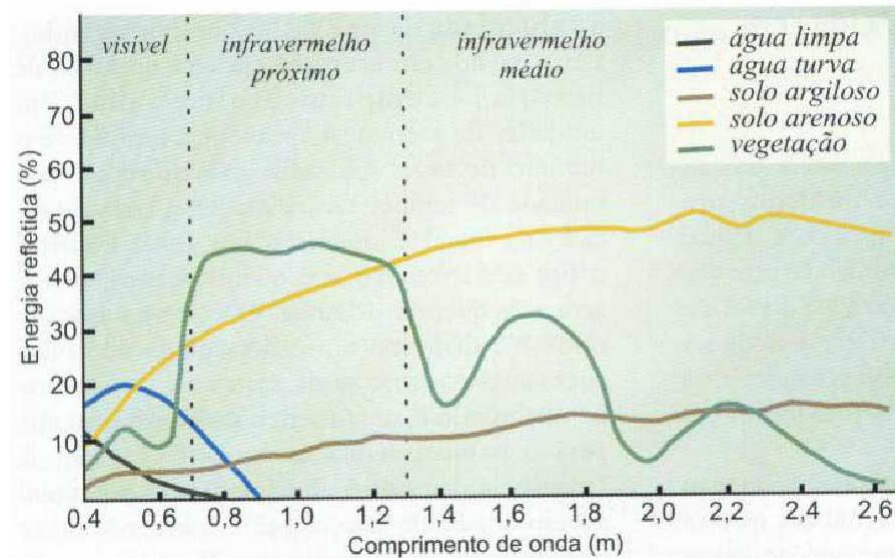


Figura 03: Curva espectral da vegetação, da água e do solo. Fonte: FLORENZANO (2002)

2.1.3 Processo de Formação das Cores

Existem diversas teorias sobre a visão das cores. A teoria mais aceita preconiza que existem três tipos de cones (receptores): sensíveis à luz vermelha, sensíveis à luz verde e sensíveis à luz azul. A luz branca ao incidir sobre a retina do olho humano, estimularia igualmente todos os receptores. A luz vermelha ao incidir sobre a retina apenas estimularia os receptores sensíveis àquela radiação provocando a percepção visual da cor vermelha. Quando a cor amarela é vista, a sensação resulta do fato de que tanto os receptores sensíveis ao verde quanto ao vermelho estão sendo estimulados com a mesma intensidade.

O primeiro cientista a provar que a sensação de luz branca era o resultado da existência simultânea de “luzes” de vários matizes foi Isaac Newton, através de um experimento simples, que consistiu em fazer incidir um feixe de luz branca sobre um prisma. A luz emergente do prisma projetada num anteparo branco resultou numa sucessão de diferentes matizes semelhantes às observadas em um arco-íris. O fato de o prisma promover a decomposição da luz branca comprova a natureza ondulatória da radiação, visto que esta se deve a variação do índice de refração do prisma nos diferentes comprimentos de onda. Cada matiz decomposto está dessa forma associado a uma determinada frequência de radiação ou comprimento de onda.

O que as cores que conhecemos de fato, denominadas de luz visível, representam é uma parcela diminuta do espectro eletromagnético, se estendendo de 400 nm a 700 nm aproximadamente, tal como visto na Figura 4. Aceita-se internacionalmente desde 1931 os valores 435,8 nm, 546,1 nm e 700 nm como os que representam espectralmente as três cores

primárias aditivas, azul, verde e vermelho respectivamente, de acordo com a CIE (“Commission Internationale de l’Eclairage”) (SOUTO, 2000).

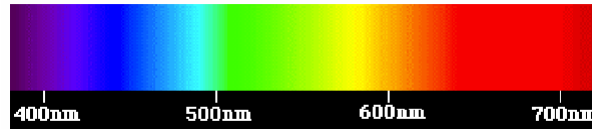


Figura 4: Espectro dos comprimentos de onda da luz visível. Fonte: SOUTO (2000)

O CIE definiu em 1931 três outras cores primárias, X, Y e Z, denominadas valores triestímulos. A vantagem destas com relação às funções das cores primárias vermelho, verde e azul, reside no fato de não haver valores (pesos) negativos. Uma representação gráfica dos coeficientes tricromáticos foi proposta e recebeu o nome de diagrama de cromaticidade (Figura 5), considerando como fonte de luz o iluminante padrão C (média da luz do dia).

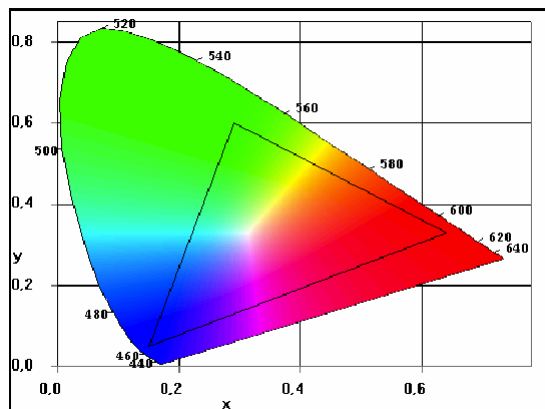


Figura 5: Diagrama de cromaticidade do CIE. Fonte SOUTO (2000)

O triângulo localizado no interior do diagrama de cromaticidade delimita a região onde estão todas as cores que as cores primárias aditivas vermelho, verde e azul são capazes de reproduzir. Este triângulo é denominado “gamut”, cujos vértices situam-se sobre cores primárias vermelho, verde e azul.

De acordo com Foley et. al (1990), um espaço de cores é um sistema tridimensional de coordenadas, onde cada eixo refere-se a uma cor primária. A quantidade de cor primária necessária para reproduzir uma determinada cor, é atribuída a um valor sobre o eixo correspondente.

2.1.3.1 Espaço de cores RGB

O modelo de espaço de cores RGB é provavelmente o mais usado entre os modelos de cores, especialmente para dados de 8 bits. A teoria do espaço de RGB (vermelho-verde-azul), de Thomas Young (1773-1829), é baseada no princípio de que diversos efeitos cromáticos são obtidos pela projeção da luz branca através dos filtros vermelho, verde e azul e pela superposição de círculos nas cores projetadas (Figura 6).

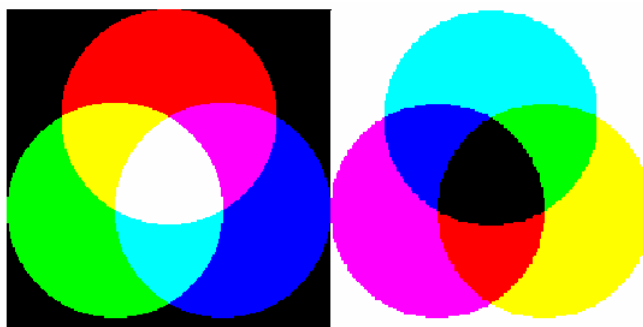


Figura 06: Círculos representando as cores primárias e secundárias do sistema aditivo, onde as interseções indicam a cor resultante da soma entre as cores dos círculos correspondentes. Fonte: ENVI (2000)

Conforme Souto (2000), a luz branca é produzida se os três círculos coincidirem, sendo uma composição entre as cores primárias. As cores primárias não podem ser produzidas pela mistura de duas delas, por isso são definidas como cores primárias aditivas. Outras cores são produzidas quando duas cores se misturam:

- vermelho + azul = magenta
- vermelho + verde = amarelo
- verde + azul = ciano

Com a variação da quantidade relativa das cores primárias, uma enorme gama de cores pode ser produzida, se incluir diversos tons a cada uma delas. Usando-se filtros, as cores podem ser subtraídas da luz branca:

- subtração de vermelho = ciano
- subtração de verde = magenta
- subtração de azul = amarelo

Essas cores são definidas como cores primárias subtrativas.

O espaço de cores RGB é tradicionalmente representado através de uma figura geométrica denominada de “cubo das cores”, apresentado na Figura 7.

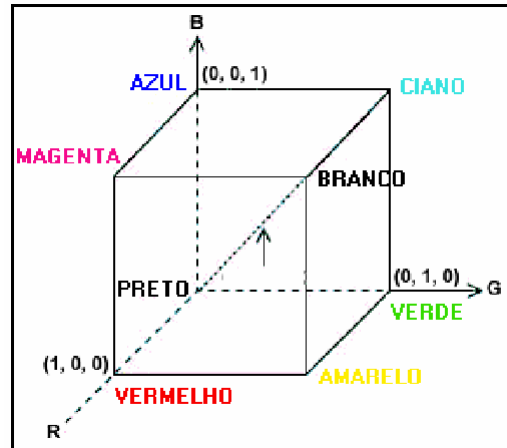


Figura 07: Cubo representando o espaço de cores RGB.

Na Figura 7, os valores sobre os eixos R, G e B, estão normalizados, ou seja, variam de 0 a 1. Note que os vértices do cubo representam as cores aditivas primárias e secundárias, a exceção dos vértices referentes ao preto e ao branco, em cuja diagonal que os liga estão localizados os tons de cinza. Sobre as arestas do cubo, diz-se localizarem as cores saturadas neste espaço.

Cor saturada não significa cor pura. A cor saturada está restrita ao espaço de cores a qual a mesma está inserida, e este espaço de cores por sua vez, está restrito às cores delimitadas pelo “gamut”. Enquanto que pura somente é aquela localizada no contorno do diagrama de cromaticidade mostrado na Figura 5. Portanto, cor totalmente pura o espaço RGB não é capaz de reproduzir. (SOUTO, 2000.)

2.1.3.2 Espaço dos Atributos de Cores: Matiz, Saturação e Intensidade

No espaço de cores visto acima, os seus componentes (eixos) representam uma quantização da energia, referente aos comprimentos de onda respectivos às cores primárias vermelho, verde e azul do espectro da luz visível. Qualquer ponto interior ao espaço de cores representa uma cor, que é resultado da combinação das três cores primárias.

Esta cor por sua vez, dependendo dos valores dos componentes escolhidos, terá uma intensidade (brilho) associada, uma quantidade de luz branca que determina a sua saturação e

uma cor predominante a qual chama-se matiz. A partir destes três atributos, é possível igualmente construir uma representação espacial que para a mesma cor obtida pelo espaço de cores. Esta representação espacial é o espaço de atributos de cores.

Os valores de intensidade e de saturação variam desde 0 até 1, enquanto os valores de matiz estão compreendidos entre os ângulos 0 e 360 graus. Para ϕ igual a 0, 120 e 240 graus, o matiz será vermelho, verde e azul respectivamente, isto é, as três cores primárias. (SOUTO, 2000).

A seguir serão apresentados alguns modelos de cores que fazem uso de representação através dos atributos de cores.

Modelo de Cores HSV

HSV é a abreviatura para o sistema de cores formadas pelas componentes *Hue* (tonalidade), *Saturation* (Saturação) e *Value* (Valor). Esse sistema também é conhecido como **HSB** (*Hue, Saturation e Brightness* - Tonalidade, Saturação e Brilho, respectivamente). Esse sistema de cores define o espaço de cor conforme descrito abaixo, utilizando seus três parâmetros:

Tonalidade ou Matiz

- Medida do comprimento de onda médio da luz que ele reflete ou emite define a cor do objeto.
- Atinge valores de 0° a 360°, mas para algumas aplicações, esse valor é normalizado de 0 a 100%.

Saturação

- Também chamado de "pureza". Quanto menor esse valor, mais com tom de cinza aparecerá a imagem. Quanto maior o valor, mais "pura" é a imagem.
- Expressa o intervalo de comprimentos de onda ao redor do comprimento de onda médio no qual a energia é refletida ou transmitida.
- Atinge valores de 0 a 100%.

Valor ou Brilho

- Define o brilho da cor. Atinge valores de 0 a 100%.

Esse sistema foi inventado no ano de 1978, por Alvy Ray Smith. É caracterizada por ser uma transformação não-linear do sistema de cores RGB (WIKIPÉDIA, 2007).

Geometricamente, o espaço HSV é parecido com um modelo RGB, sendo representado pelo hexágono da Figura 8.

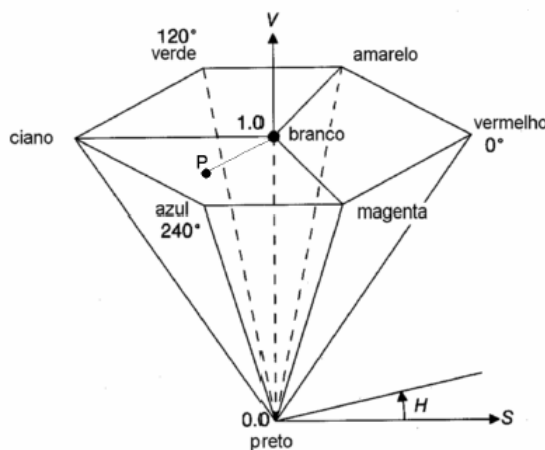


Figura 8: Hexágono representando o modelo de cores HSV. Fonte: ENVI (2000)

A altura do hexágono corresponde ao eixo acromático do cubo RGB. No eixo da estrutura hexacônica situam-se os dados de Valor (**V**), tendo origem (0) no vértice e máximo valor (1) na base.

A distância de um ponto P, em qualquer seção transversal hexagonal da pirâmide até um ponto P_e dado pela interseção do eixo deste com a seção hexagonal, nos dá o valor da Saturação (**S**), que irá variar de 0 a 1.

Por fim, o Matiz (**H**) é o ângulo formado pelos segmentos de reta que ligam P a P_e e V_{ve} a P_e , onde V_{ve} é notado como o vértice correspondente ao vermelho. No sentido anti-horário, partindo de V_{ve} .

Transformação RGB para HSV (Fonte: SOUTO, 2000)

Seja uma cor definida por RGB, onde R, G e B estão entre 0 e 1, onde estes valores correspondem, respectivamente, ao maior e ao menor valor possível para cada. A transformação para os parâmetros (H, S, V) dessa cor pode ser determinada pelas fórmulas abaixo.

Seja MAX e MIN os valores máximo e mínimo, respectivamente, dos valores (R, G, B):

$$H = \begin{cases} 60 * \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0 \rightarrow \text{if } (MAX = R) \text{ e } (G \geq B) \\ 60 * \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360 \rightarrow \text{if } (MAX = R) \text{ e } (G < B) \\ 60 * \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120 \rightarrow \text{if } (MAX = G) \\ 60 * \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240 \rightarrow \text{if } (MAX = B) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$S = \frac{MAX - MIN}{MAX} \quad (2.3)$$

$$V = MAX \quad (2.4)$$

Os resultados dão a tonalidade variando de 0° a 360°, indicando o ângulo no círculo onde a tonalidade (H) está definido, e a saturação e o brilho variando de 0 a 1, representando o menor e o maior valor possível.

Transformação de HSV para RGB (Fonte: SOUTO, 2000)

Seja uma cor definida por HSV, onde H, varia de 0° a 360°, informando o ângulo, em graus, no círculo onde este parâmetro está definido, e com S e V variando de 0 a 1. A transformação para os parâmetros (R, G, B) desta cor podem ser calculados conforme a formulação abaixo:

Primeiramente, se S = 0, o resultado será cinza. Para esse caso, os valores de R, G e B são iguais a V e, o valor de H é irrelevante. Para S diferente de zero, as equações abaixo são aplicáveis:

$$H_i = \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \text{ mod } 6 \quad (2.5)$$

$$f = \frac{H}{60} - H_i \quad (2.6)$$

$$p = V \cdot (1 - S) \quad (2.7)$$

$$q = V \cdot (1 - f \cdot S) \quad (2.8)$$

$$t = V \cdot (1 - (1 - f) \cdot S) \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } H_i = 0 \rightarrow R = V, G = t, B = p \\ \text{if } H_i = 1 \rightarrow R = q, G = V, B = p \\ \text{if } H_i = 2 \rightarrow R = p, G = V, B = t \\ \text{if } H_i = 3 \rightarrow R = p, G = q, B = V \\ \text{if } H_i = 4 \rightarrow R = t, G = p, B = V \\ \text{if } H_i = 5 \rightarrow R = V, G = p, B = q \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Essas equações fornecem R, G e B variando de 0 a 1.

Modelo de Cores HSV de Harrington (1987)

Este modelo de cores é baseado na geometria de um cilindro, que se assemelha ao sistema de cores de Munsell e utilizado por Kruse & Raines (1984), que originalmente foi desenvolvido para utilizações geológicas e foi aplicado para aumento de contraste.

A transformação do espaço de cores RGB para o HSV começa, primeiramente, pela rotação do sistema de eixos do espaço RGB, dada pela seguinte transformação linear:

$$\begin{pmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 2/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Após, os valores de matiz (H), saturação (S) e intensidade (V) são obtidos por meio das igualdades dadas abaixo:

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.12)$$

$$S = \sqrt{(V_1)^2 + (V_2)^2} \quad (2.13)$$

$$V = I \quad (2.14)$$

onde $0 \leq S, V \leq 1, 0 \leq H < 2\pi$.

A transformação inversa será dada por:

$$V_1 = S \cdot \cos(H) \quad (2.15)$$

$$V_2 = S \cdot \sin(H) \quad (2.16)$$

$$I = V \quad (2.17)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/3 & 0 & 2\sqrt{6} \\ \sqrt{3}/3 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \\ \sqrt{3}/3 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Formulário Fonte: ENVI (2000)

Modelo de Cores HLS

A transformação do sistema de coordenadas cilíndricas para um cubo resulta o modelo de pirâmide duplo-hexacônica. Aqui, como acontece com V no HSV, os valores de luminosidade (L) encontram-se no eixo da estrutura piramidal, variando de 0 (embaixo) a 1 (no topo). No entanto, diferentemente do que ocorre no HSV, os valores de L e S nos quais obteremos o mais forte nível de luminosidade e saturação é em $L=0,5$ e $S=1$, enquanto que no HSV, para se ter o mesmo efeito, teríamos $V=1$ e $S=1$ (FOLEY et al., 1990).

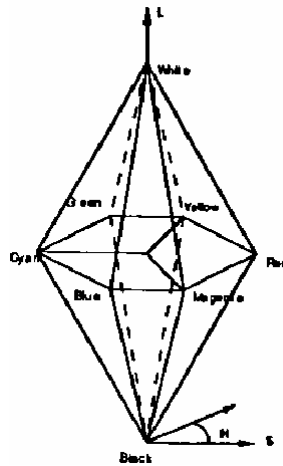


Figura 9: Modelo de pirâmide duplo-hexacônica representando o modelo de cores HSL. Fonte: ENVI (2000)

A saturação, assim como o matiz, é obtida de forma similar a saturação no HSV.

$$L = \frac{\max + \min}{2} \quad (2.19)$$

Quando $\max = \min$, $S=0$ e H não é definido

$$\begin{cases} S = \frac{\max - \min}{\max + \min} & \text{quando } L < 0,5 \\ S = \frac{\max - \min}{2 - \max - \min} & \text{quando } L > 0,5 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} H = \frac{G - B}{\max - \min}, & \text{quando } R = \max \\ H = 2 + \left(\frac{B - R}{\max - \min} \right), & \text{quando } G = \max \\ H = 4 + \left(\frac{R - G}{\max - \min} \right), & \text{quando } B = \max \end{cases} \quad (2.21)$$

Formulário Fonte: ENVI (2000)

A transformação inversa inicia-se pela escolha do ângulo do matiz no intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$. $(R, G, B) = (L, L, L)$, quando $S = 0$ e H não é definido.

Modelo de Cores IHS

O espaço de cores conhecido por IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) pode ser graficamente representado como um cone e usa coordenadas cilíndricas polares para representar as cores, ao invés de coordenadas cartesianas como o sistema RGB. O vértice do cone IHS representa o preto, enquanto o seu eixo coincide com o eixo acromático. A intensidade aumenta em sentido contrário ao do vértice. Uma seção circular do cone mostra a variação de matizes ao redor de perímetro. A saturação aumenta para fora do centro, passando de cinza para tons pastéis e destes para matizes espectrais puros.

Já definidos os conceitos de Matiz e Saturação, segue a definição do elemento **Intensidade**, presente neste modelo de cores.

Intensidade

- Medida da energia total envolvida em todos os comprimentos de onda responsáveis pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho;
- Distância de um ponto até a origem ou ápice do cone.

Modelo de IHS de Pratt (1991)

A transformação do espaço de cores RGB para o IHS, segundo Pratt (1991) primeiramente é dada pela seguinte transformação linear:

$$\begin{pmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{6} & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{6} & 2/\sqrt{6} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Após, os valores de matiz (H), saturação (S) e intensidade (V) são obtidos por meio das equações (2.12) a (2.14).

A transformação inversa, após o cálculo dos coeficientes V_1 e V_2 das equações (2.15) e (2.16), será dada por:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 12 & -4,9 & -2,45 \\ -6 & 2,45 & 2,45 \\ -3 & 2,45 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Formulário Fonte: ENVI (2000)

2.1.3.3 Problemas Inerentes aos Atributos de Cores

Conforme Souto (2000), o atributo matiz apresenta características vantajosas, como a baixa influência da variação de iluminação na cena. Contudo, em algumas situações, sob condições de saturação e/ou intensidade com reduzido valor, o valor de matiz se torna instável. Neste trabalho do autor, foi feito um experimento a fim de ilustrar esta instabilidade que consistiu dos seguintes passos:

A) Inicialmente foi simulada uma situação onde a saturação fosse baixa e o brilho alto. Partindo de uma coordenada (111; 111; 115) no espaço de cores RGB, variou-se, de um em um, apenas o valor do componente vermelho (R) até o valor 211. Cada coordenada foi convertida para uma coordenada no espaço de atributos HSV, cujos valores iniciais foram (240; 0,0348; 0,451);

B) Em seguida, o procedimento foi repetido, partindo-se da mesma coordenada, variando o valor do componente verde. Nos gráficos das Figuras 10a e 10b, são mostradas as curvas de matiz, saturação e intensidade para os dois procedimentos realizados.

Nos dois casos, o que se percebe é uma acentuada inclinação da curva de matiz a baixos valores de saturação. E, na medida em que o valor de saturação aumenta, a inclinação da curva de matiz decresce até chegar a uma situação de estabilidade.

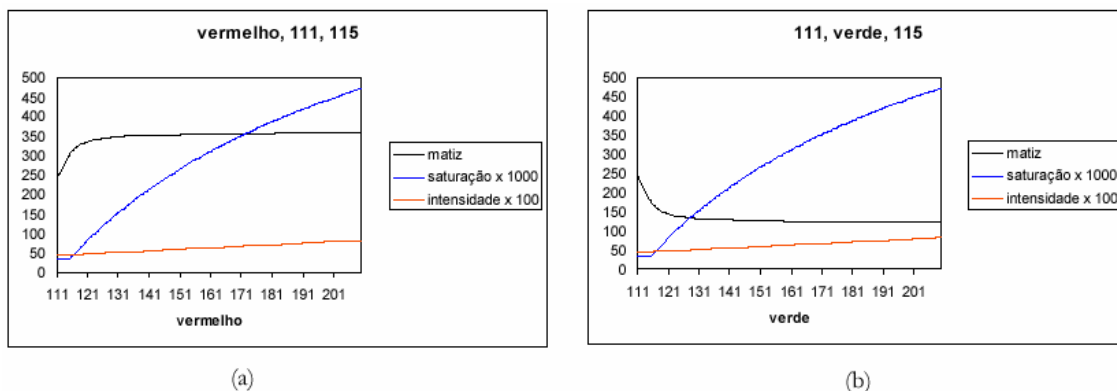


Figura 10: Gráficos relativos aos experimentos (a) e (b). Fonte: SOUTO (2000)

Experimento semelhante foi feito para variações de valores de intensidade (ou brilho), com o que pode-se inferir que, para valores baixos de brilho, o componente matiz é mais sensível (ou instável) as variações de valores das componentes no espaço RGB.

2.2 Estrutura das Imagens em SR

As imagens de sensoriamento remoto, por sua natureza digital ou discreta, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou grid. Cada cela desse grid tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo "*linha e coluna*", representados por "*x*" e "*y*", respectivamente. Por convenção, a origem do grid é sempre no seu canto superior esquerdo. O nome dado a essas celas é pixel, derivado do inglês "*picture element*".

Para um mesmo sensor remoto, cada pixel representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra. Cada cela possui também um atributo numérico "*z*", que indica o nível de cinza dessa cela, que obviamente vai variar do preto ao branco; esse nível de cinza é conhecido em inglês por DN, de "*digital number*". (Figura 11)

O DN de uma cela representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Deve ser ressaltado que o DN de um pixel corresponde sempre à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel. Uma imagem digital pode então ser vista como uma matriz, de dimensões *x* linhas por *y* colunas, com cada elemento possuindo um atributo *z* (nível de cinza). No caso das imagens de sensoriamento remoto, essas matrizes possuem dimensões de até alguns milhares de linhas e de colunas. (CROSTA, 1993)

Gonzalez e Woods (1992) (citado por Souto, 2000) definem ainda que a imagem de uma cena segue um modelo de uma função bidimensional $f(x,y)$ no qual se considera a iluminação e reflectância em cada coordenada espacial (x,y) da imagem, e o seu valor é finito. Define-se reflectância como sendo a razão da quantidade de radiação refletida por objeto pela quantidade de radiação que incide nele, e é representada pelo componente $r(x,y)$. O componente da iluminação, proveniente de uma fonte, é dado por $i(x,y)$, que combinado com o componente $r(x,y)$ da reflectância, nos dá:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (2.24)$$

com $0 < i(x,y) < \infty$ e $0 < r(x,y) < 1$

A situação onde $r(x,y)$ é nulo indica que o objeto iluminado absorveu toda a luz incidente, ocorrendo justamente o contrário quando $r(x,y)$ vale um, isto é, o objeto reflete toda luz que nele incide. O valor de $i(x,y)$ é determinado principalmente pela fonte de luz, que na grande maioria dos casos trata-se do sol. Portanto, a iluminação da cena, sofre influência de fatores conjugados: o ângulo de inclinação solar e de aquisição (azimutal), com a própria topografia do terreno. Quanto maior o ângulo de incidência da luz do sol e/ou azimutal, mais regiões de sombra existirão na imagem, como consequência de baixos valores do componente de iluminação $i(x,y)$ da Expressão (2.24).

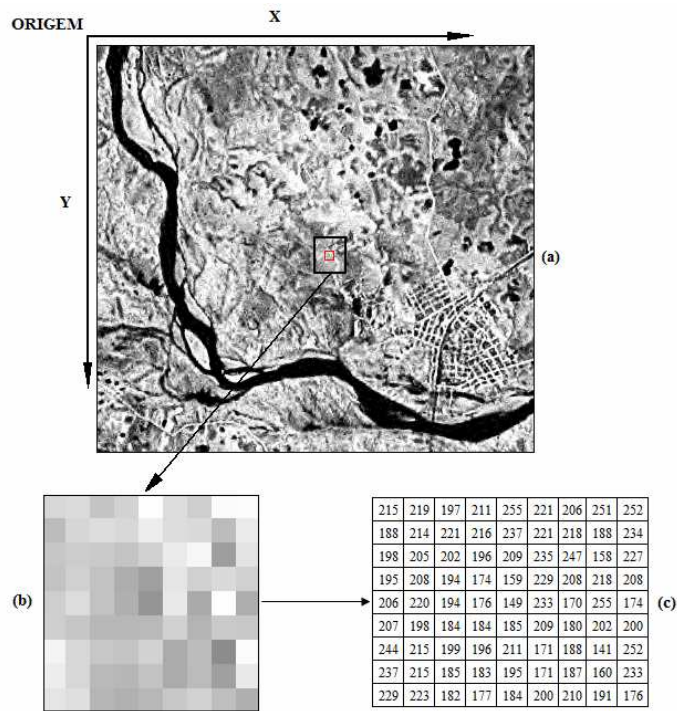


Figura 11: (a) imagem digital com grupo de pixels selecionados; (b) zoom da janela de 9x9 pixels; (c) valor dos contadores digitais da função $f(x, y)$.

2.2.1 Imagens Coloridas em SR

As imagens obtidas por sensores eletrônicos, em diferentes canais, são individualmente produzidas em preto e branco. A quantidade de energia refletida pelos objetos vai determinar a sua representação nessas imagens em diferentes tons de cinza, entre o branco (quando refletem toda a energia) e o preto (quando absorvem toda a energia). Ao projetar e sobrepor essas imagens, através de filtros coloridos, azul, verde e vermelho (cores

primárias), é possível gerar imagens coloridas, conforme ilustrado nas Figuras 12, 13 e 14. Nas imagens coloridas, a cor de um objeto vai depender da quantidade de energia por ele refletida, da mistura das cores (segundo o processo aditivo) e da associação das cores com as imagens.

Essa associação explica o fato de a vegetação e a área urbana serem representadas com cores diferentes nas imagens coloridas das Figuras 12 e 13, embora as imagens originais sejam as mesmas. O que mudou foi apenas a associação das cores com essas imagens (FLORENZANO, 2002).

Analisando as Figuras 12 a 14, podemos verificar que se um objeto é branco nas três imagens em preto e branco, que dão origem à imagem colorida, nessa imagem (colorida) ele também é representado em branco como, por exemplo, a areia da praia (Figura 14). O mesmo processo ocorre quando um objeto é preto nas três imagens originais. Por isto, ele é representado em preto também na imagem colorida como, por exemplo, a sombra do relevo e a água mais limpa e profunda do oceano.

Se um objeto é claro (branco) somente em uma das imagens originais, na imagem colorida ele é representado pela cor que foi associada a essa imagem original, o que explica a vegetação verde na imagem da Figura 12 e a vegetação vermelha na Figura 13. Essas foram as cores associadas às imagens do canal 4 do infravermelho próximo, região na qual a vegetação reflete mais energia e aparece clara nessas imagens.

Se um objeto aparece claro em duas das imagens originais, sua cor na imagem colorida vai ser a resultante da mistura entre as duas cores que forem associadas às imagens originais nas quais ele é branco. Tomemos como exemplo a área urbana que aparece clara nas imagens dos canais 3 e 5. Na Figura 12, as imagens foram associadas às cores azul e vermelho, respectivamente. Pelo processo aditivo das cores, o azul misturado com o vermelho resulta no magenta, que é a cor que representa a área urbana na imagem colorida. Na imagem colorida da Figura 13, a área urbana está representada em ciano que é o resultado da mistura de azul com verde, cores associadas respectivamente às imagens dos canais 3 e 5 (FLORENZANO, 2002).

Esses dois tipos de imagens coloridas (Figuras 12 e 13) são as mais utilizadas. Nelas, a cor dos objetos, em geral, é falsa. Outras combinações podem ser obtidas e, dentre elas, destacamos a imagem colorida natural (Figura 14), na qual as cores dos objetos são verdadeiras (FLORENZANO, 2002).

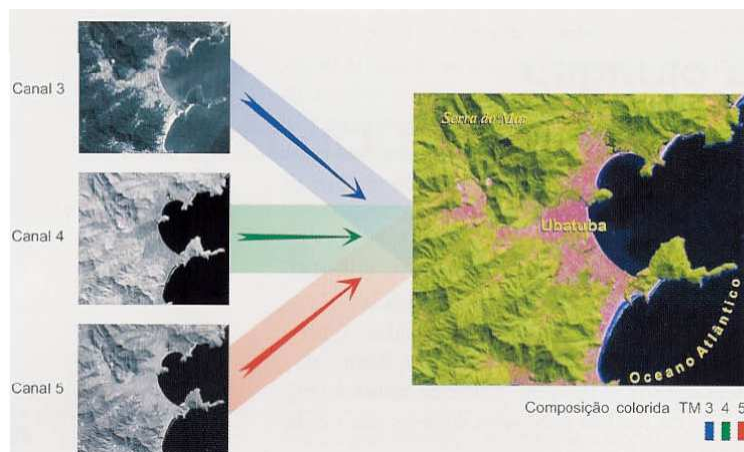


Figura 12: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 3, 4 e 5, com as cores azul, verde e vermelho. Fonte: FLORENZANO (2002)

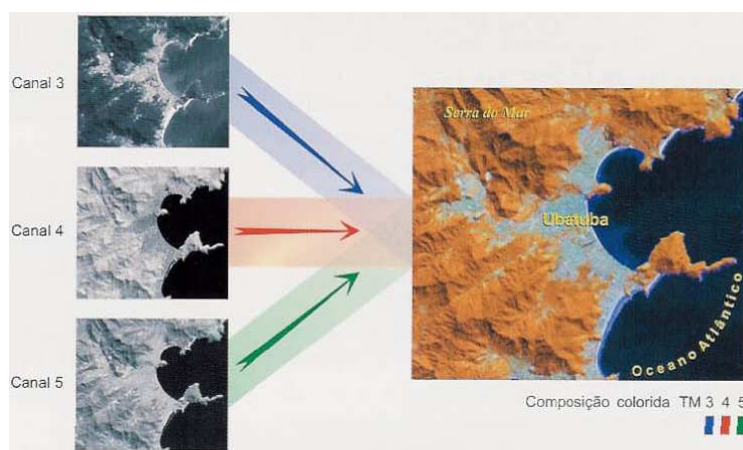


Figura 13: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 3, 4 e 5, com as cores azul, vermelho e verde. Fonte: FLORENZANO (2002)

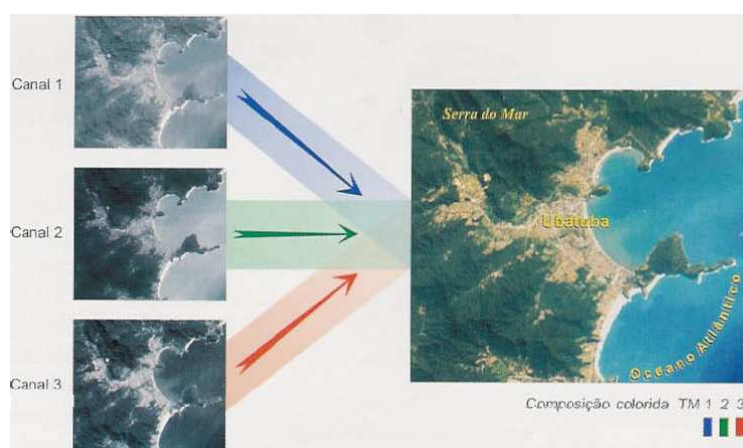


Figura 14: Imagem colorida, obtida a partir das imagens ETM+ LANDSAT-7, dos canais 1, 2 e 3, com as cores azul, verde e vermelho. Fonte: FLORENZANO (2002)

As composições coloridas constituem-se então em uma poderosa forma de sintetizar, numa única imagem, uma grande quantidade de informação, ao mesmo tempo em que representam essa informação em diferentes cores, facilitando assim a sua interpretação.

2.2.2 Propriedades de um Pixel

A cada ponto imageado pelos sensores corresponde uma área mínima denominada "pixel" (do inglês *picture element*), que deve estar geograficamente identificado, e para o qual são registrados valores digitais relacionados com a intensidade de energia refletida em faixas (bandas) bem definidas do espectro eletromagnético (SPRING, 1996).

Uma propriedade importante de um pixel é sua vizinhança. A seguir são definidas a vizinhança 4 e a vizinhança 8 de um pixel.

Vizinhança 4

A vizinhança 4 de um pixel P é definida pelo conjunto dos pixels adjacentes a P , não levando em conta os pixels localizados nas diagonais passando por P (Figura 15).

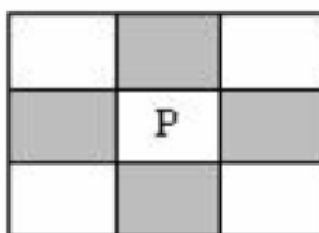


Figura 15: Vizinhança 4 de um pixel

Vizinhança 8

A vizinhança 8 de um pixel P é formada pelo conjunto de todos os pixels que são adjacentes a P (Figura 16).

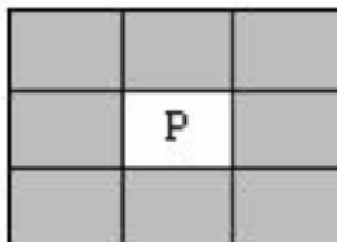


Figura 16: Vizinhança 8 de um pixel

2.2.3 Formatos de Imagens

Conforme Carvalho (2003), o formato de uma imagem refere-se ao modo como os dados da imagem estão armazenados em arquivos e como se faz a interpretação desses dados para a visualização da imagem. A opção pelo melhor formato deve levar em consideração alguns fatores como a riqueza de detalhes a se preservar, quantidade de dados, tamanho máximo do arquivo, quantidade de cores (nº de bits), entre outros.

A interpretação dos dados contidos em um arquivo normalmente passa despercebido pelo usuário quando este utiliza um software de geoprocessamento ou um programa para visualização de uma imagem. Esta diferença de formatação entre os arquivos de imagens explica o porquê de alguns softwares possuírem ou não suporte a determinados formatos.

Entre os formatos mais utilizados podemos citar:

- GIF
- JPEG
- PNG
- BitMap
- Tiff

2.2.3.1 Formato GIF

O formato *GIF* (Graphics Interchange Format) é um tipo de arquivo para imagens que trabalha com uma paleta de 256 cores e foi criado pela empresa CompuServe, em 1987. Isso faz com que o *GIF* não seja recomendável para figuras que precisam de aproximação da realidade, a não ser que a imagem em questão seja em preto e branco (escala de cinza). Devido a essa característica, o uso do formato *GIF* é voltado para ícones ou imagens que não precisam de muitas cores (ilustrações, por exemplo).

Apesar deste formato parecer limitado devido ao número baixo de cores com que trabalha, o *GIF* é muito utilizado por alguns recursos que oferece. Um deles é a capacidade de utilizar fundo transparente. Com isso, é possível, por exemplo, que um site de internet publique uma imagem em *GIF* e esta terá como fundo a cor da página. Além disso, o *GIF* permite que uma seqüência de imagens seja salva em um único arquivo, onde cada imagem surge no lugar da anterior após um tempo pré-determinado. Isso dá a sensação de animação.

O **GIF** utiliza um formato de compressão que não altera a qualidade da imagem a cada salvamento, como ocorre com o **JPEG** (tópico seguinte). Considerando esta forma de compressão juntamente com a capacidade de trabalhar apenas com 256 cores, o **GIF** consegue criar imagens com tamanho bastante reduzido. Isso foi essencial para o início da internet, onde a velocidade era bem mais baixa que a dos modems de 56K.

- Aplicações recomendadas: Arte linear; desenhos, logotipos, imagens com áreas transparentes, animações e imagens de documentos HTML da World Wide Web e de outros serviços on-line.
- Propósito do desenvolvimento: Minimizar o tamanho do arquivo e o tempo de transferência eletrônica.
- Compressão: LZW (Lempel-Ziv-Welch)
- Cores: 256
- Bits: 8 bits
- Entrelaçamento: Sim
- Animação: Sim
- Transparência: Sim

2.2.3.2 Formato JPEG

O formato **JPEG** (Joint Pictures Expert Group) é um tipo de arquivo para armazenamento de imagens que pode trabalhar com esquema de cores em 24 bits. Isso significa que este formato aceita 16,8 milhões de cores. O **JPEG** é um dos formatos de imagens mais populares e isso se deve à capacidade de formar imagens fiéis à original. Além disso, os arquivos em **JPEG** costumam não serem grandes (RAMOS, 2000).

O **JPEG** utiliza um algoritmo de compactação que se baseia na capacidade do olho humano. No entanto, mesmo sabendo-se que arquivos em **JPEG** podem trabalhar com até 16,8 milhões de cores, o olho humano não é capaz de enxergar todas elas de uma vez. Assim, é possível tirar uma série de informações que representam cores em imagens e manter apenas aquelas visíveis ao olho humano. Em outras palavras, o formato **JPEG** "tira" da imagem aquilo que os humanos não conseguem ver. Esse processo é conhecido como compressão. Isso faz com que imagens bastante realistas sejam criadas, ao mesmo tempo em que esses arquivos não ficam pesados.

Algo interessante no **JPEG** é que os arquivos podem ter diferentes níveis de compressão. Quanto mais existir compressão, ou seja, retirada de informação, menor será o tamanho do arquivo, porém pior será sua qualidade. Uma desvantagem do **JPEG** é que a imagem normalmente perde qualidade a cada vez que o arquivo é salvo (RAMOS, 2000).

- Extensão: jpg, jpe, jpeg, jfif
- Desenvolvedor: Joint Photographic Experts Group
- Aplicações recomendadas: Fotos e transferências de imagens para a web.
- Propósito do desenvolvimento: Compressão de arquivos com fotos ou desenhos com muitos detalhes para documentos HTML e outros serviços online.
- Compressão: JPEG-esquema de compressão de lossy
- Cores: 16,8 milhões
- Modos de cores: CMYK, RGB e Tons de Cinza.
- Bits: 24 bits
- Descrição: Uma imagem JPEG é descompactada automaticamente ao ser aberta.

2.2.3.3 Formato PNG

O **PNG** (Portable Network Graphics) foi lançado em 1996 para concorrer com o GIF, após o anúncio da Empresa Sperry Corporation de cobrar royalties (uma espécie de taxa para poder utilizar a tecnologia) dos desenvolvedores de softwares para trabalhos gráficos que suportam o formato GIF.

O **PNG** é interessante porque consegue trabalhar com esquema de 24 bits de cores, ou seja, 16,8 milhões de cores. No entanto, em comparação com o JPEG, a compressão obtida é mais eficiente e não proporciona perda de qualidade a cada salvamento, o que permite maior fidelidade à imagem original. Além disso, as imagens em **PNG** não requerem muito espaço, podendo-se ter figuras de alta definição e tamanho em bytes pequeno. Ainda assim, o JPEG costuma ter imagens de tamanho ainda menor em alguns casos (RAMOS, 2000).

O **PNG** também possui o recurso de transparência, o que o faz uma excelente alternativa ao GIF neste caso, pois é possível ter imagens com fundo transparente, mas com o objeto utilizando um número muito maior de cores.

- Formatos: PNG e PNG Fireworks

PNG Fireworks: Contêm informações específicas do aplicativo que não são armazenadas em um arquivo PNG exportado ou em arquivos criados em outros aplicativos.

- Aplicações recomendadas: Desenhos, gráficos de imagens sólidas
- Propósito do desenvolvimento: substituir o envelhecido formato GIF
- Compressão: Distribuição progressiva
- Cores: 16,8 milhões
- Modos de cores: RGB e de cores indexadas, tons de cinza.
- Bits: 24 bits até 32 bits
- Transparência: Sim - 254 níveis

Na criação do arquivo, temos a seguinte estrutura:

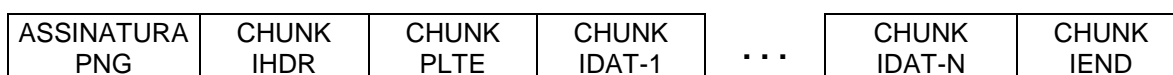


Figura 17: Estrutura do arquivo PNG. Fonte: RAMOS (2000).

Onde:

- **ASSINATURA PNG** - Oito bits reservados para assinatura PNG
- **IHDR** - Cabeçalho da imagem
- **PLTE** - Paleta de cores usadas na imagem
- **IDAT** - *Chunks* de dados da imagem
- **IEND** - Indicador de fim de dados

2.2.3.4. Formato BMP

O formato **BMP** (*BitMap*) foi desenvolvido pela Microsoft para aplicações no sistema Windows. É um formato de estrutura muito simples, tornando mínimas as possibilidades de erros na interpretação dos dados. Ele não usa nenhum tipo de compressão e, por isso, a qualidade de imagem é a melhor possível. Justamente por não usar nenhuma compressão, o tamanho do arquivo fica gigantesco.

O tamanho que uma imagem **BMP** terá pode ser calculado usando-se a seguinte fórmula, retornando resultado em bytes:

$$tam = \frac{n^{\circ} col \cdot n^{\circ} lin \cdot bits de cor}{8} \quad (2.25)$$

Em "bits de cor", utiliza-se o valor 24 para imagens com 16 milhões de cores simultâneas, 16 para imagens com 65.536 cores, 8 para imagens com 256 cores e 4 para imagens com 16 cores.

A estrutura do arquivo bitmap é apresentada na Figura 18:

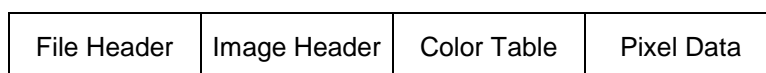


Figura 18: Estrutura do arquivo Bitmap. Fonte: RAMOS (2000).

Onde:

- **File Header (Cabeçalho de arquivo):** contém a assinatura BMP e informações sobre o tamanho e lay-out do arquivo (disposição dos dados dentro do arquivo).
- **Image Header (Cabeçalho de mapa de bits):** contém as informações da imagem contida no arquivo. Define as dimensões, tipo de compressão (se houver) e informações sobre as cores da imagem.
- **Color Table (Paleta ou mapa de cores):** somente estará presente em arquivos de imagens que usam 16 ou 256 cores (4 e 8 bits/pixel). Nas demais, em seu lugar, vem diretamente a parte seguinte: área de dados da imagem. (*opcional*)
- **Pixel Data (Área de dados da imagem contida no arquivo):** dados que permitem a exibição da imagem propriamente dita. São os dados dos pixels a serem exibidos. Podem ser com ou sem compressão.

2.2.3.5 Formato TIFF

O formato **TIFF** (*Tagged Image File Format*) foi desenvolvido em 1986 em uma tentativa de criar um padrão para imagens geradas por equipamentos digitais. O formato é capaz de armazenar imagens em preto ou branco, escalas de cinza e em paletas de cores com 24 ou com 32 emphbits. O **TIFF** é reconhecido por praticamente todos os programas de imagem (Ramos, 2000). Algumas características do formato:

- Desenvolvedor: Aldus Corporation e posteriormente pela Microsoft
- Aplicações recomendadas: Imagens sem perdas e publicações impressas.
- Propósito do desenvolvimento: Salvar imagens criadas por *scanners* e programas que editam fotografia.
- Compressão: LZW
- Modos de cores: CMYK, RGB, Lab, de cores indexadas e tons de cinza com canais alfa, e Bitmap sem canais alfa.
- Bits: 8 ou 16 bits até 24 bits
- Transparência: Sim

O *TIFF* é baseado em entidades lógicas denominadas “*Campos TIFF*”, cada uma consistindo uma *Etiqueta (Tag)*, identificada por um número. O propósito das Etiquetas, cada uma com um significado específico, é descrever os atributos e parâmetros dos dados de uma imagem.

O formato *TIFF* tem capacidade de descrever imagens geradas no formato *Bilevel* (2 níveis), *Grayscale* (vários níveis de cinza), *Palette-Color* (RGB, com os valores da imagem representando índices de uma palheta de cores, armazenada em separado) e *Full-Color RGB* (os três valores *RGB* correspondentes a cada pixel da imagem compõem a própria palheta de cores).

Inclui também a possibilidade de se efetuar compressão de dados segundo um determinado número de esquemas, que permite aos desenvolvedores um compromisso entre espaço e tempo para os seus aplicativos. Apesar disso, uma parte dos aplicativos de conversão para o formato *TIFF* disponíveis hoje não utiliza esquemas de compressão (VASCONCELOS, 2002).

O arquivo *TIFF* possui em sua estrutura quatro blocos de informações e dados, e, embora a flexibilidade do formato permita que o segmento da imagem propriamente dita possa estar armazenado em qualquer posição física do arquivo – desde que após o *Cabeçalho* - é comum encontrar a organização da Figura 19:

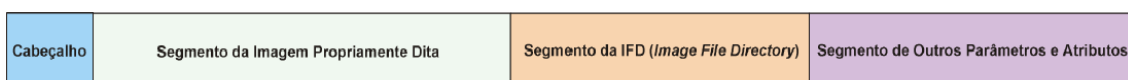


Figura 19: Estrutura do arquivo *TIFF*. Fonte: VASCONCELOS (2002)

Onde:

A) Cabeçalho (Header): contém informações sobre o tipo de arquivo e localização dos próximos segmentos;

B) Segmento da Imagem Propriamente Dita: contendo os valores que compõem os pixels da imagem;

C) Segmento IFD (Image File Directory): composto por informações sobre a organização e os parâmetros da imagem;

D) Segmento OPA (Outros Parâmetros e Atributos): contendo informações e dados complementares do arquivo *TIFF*;

Devido à importância do formato *TIFF* para o desenvolvimento desse trabalho, a seguir será mostrada uma breve descrição dos blocos de dados e informações que compõem um arquivo *TIFF*, conforme descrição encontrada em Vasconcelos (2002).

A) Cabeçalho (Header)

O *Cabeçalho* é sempre o primeiro segmento de informações de um arquivo *TIFF*, contido em um registro de 8 *bytes* de comprimento. É composto por três campos, conforme a Figura 20. Cada campo é definido por um tamanho de 2, 2, e 4 *bytes*, respectivamente:



Figura 20: Estrutura do cabeçalho do arquivo *TIFF*. Fonte: VASCONCELOS (2002)

- **Ordem de Armazenamento dos Bytes no arquivo:** é importante para se saber em que tipo de plataforma foi gerada a imagem, de forma a se ler corretamente os *bytes* contidos no arquivo. Em plataformas com processador *INTEL*, a ordem de armazenamento é sempre do *byte* menos significativo para o mais significativo e definido por um código “II” (dois caracteres *ASCII*). Em processadores que usam o esquema *MOTOROLA*, a ordem de armazenamento é do *byte* mais significativo para o menos significativo, sendo “MM” o seu código.
- **Número Característico de Arquivos *TIFF*:** o identificador característico de arquivos *TIFF* é o número “42”, que possui a singular propriedade de ter mesma representação

na sua leitura, independentemente da ordem de armazenamento dos *bytes* no arquivo, se *INTEL* ou *MOTOROLA*.

- **Offset (valor) para Ler a IFD (Image File Directory):** o *Offset* é definido como um valor correspondente ao número de *bytes*, contados a partir do início físico do arquivo *TIFF*, que deve ser “pulado” para iniciar a leitura da informação ou dado contemplado. No caso do *Cabeçalho* do arquivo *TIFF*, o valor do *offset* aponta para o segmento no arquivo referente à primeira (e, geralmente, única) *IFD (Image File Directory)*.

B) Segmento Da Imagem Propriamente Dita

É neste segmento que se encontram armazenados os atributos numéricos relativos a cada pixel da imagem, os quais podem ter vários significados. Pode conter um único valor específico, expressando uma determinada propriedade quantitativa do meio físico (altitude, batimetria, p.e.), ou ser ainda um atributo pictórico de cor (contador digital), resultante de uma imagem de sensoriamento remoto.

Para o seu armazenamento em um arquivo *TIFF*, os pontos referentes ao *grid* da imagem são normalmente organizados segundo colunas. Geralmente, as linhas são armazenadas de cima para baixo, com a primeira linha correspondendo à linha superior da imagem, e a última linha, à linha inferior da imagem, significando que a origem fica no canto superior esquerdo da imagem (valor 1 da linha 1), à exemplo da Figura 21.

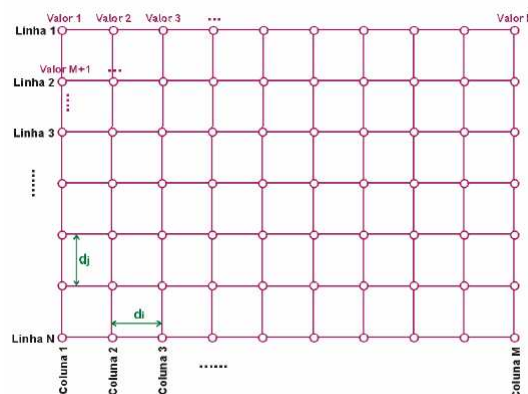


Figura 21: Exemplo de grid de uma imagem, estruturada em Colunas x Linhas. Fonte: VASCONCELOS (2002)

Geralmente constitui a maior parte do arquivo, pois necessita 1 ou 2 bytes de informação para cada pixel. Além disso, as informações sobre cada pixel podem estar

organizadas de maneira contínua ou em planos separados, dependendo ainda do número de bandas existentes na imagem. A forma de ler estes valores, bem como outras informações, são obtidas através da leitura das *Etiquetas TIFF*, que serão vistas a seguir, extraídas de Vasconcelos (2002).

C) Segmento *IFD (Image File Directory)*

A *IFD (Image File Directory)* é o segmento de arquivos *TIFF* projetado para abrigar as *Etiquetas (Tags)*. Cada *Etiqueta* tem um significado particular, que se refere a alguma definição dos atributos e parâmetros da imagem propriamente dita, e da forma de seu armazenamento no arquivo *TIFF*.

Conforme a Figura 22, o primeiro registro da *IFD* informa o número “N” de “*Campos TIFF*” ou o *Número de Etiquetas*, seguido pelos registros das “N” *Etiquetas* existentes.



Figura 22: Estrutura do segmento IFD do arquivo *TIFF*. Fonte: VASCONCELOS (2002)

O primeiro registro, que define o *Número de Etiquetas* contidas na *IFD*, tem um comprimento de 2 bytes. Cada *Etiqueta* ocupa um espaço no arquivo *TIFF* correspondente a 12 bytes. Ao final da *IFD*, após o registro correspondente à última *Etiqueta*, deve haver um último registro, de comprimento igual a 4 bytes, que estabelece o *offset* para a leitura de uma segunda *IFD* (se houver). Na grande maioria dos casos, os arquivos *TIFF* possuem apenas uma *IFD*, com este registro contendo um valor igual a 0 (zero), significando que não existe outra *IFD* no arquivo (VASCONCELOS, 2002).

As *Etiquetas (Tags)* do Formato *TIFF* Básico são identificadas através de um número específico (*Número da Etiqueta*). Cada *Etiqueta* é formada por um registro de 12 bytes, dividido em quatro campos, com 2, 2, 4, e 4 bytes, respectivamente, conforme Figura 23:

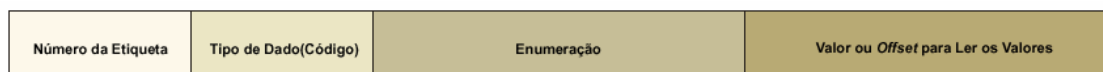


Figura 23: Estrutura de uma Etiqueta do arquivo *TIFF*. Fonte: VASCONCELOS (2002)

Cada *Número de Etiqueta* define um dos parâmetros ou atributos da imagem. Essas informações podem ser lidas no campo *Valor* de cada *Etiqueta* específica ou em outra posição física do arquivo *TIFF*, no segmento denominado *Outros Parâmetros e Atributos (OPA)*. No

segundo caso, o campo *Valor* contém um apontador (*offset*) para a posição física no referido segmento, que armazena essas informações.

Se o valor do campo *Enumeração* for igual a “1”, o número contido no campo *Valor* representará o dado específico para a *Etiqueta*. Se o valor do campo *Enumeração* for maior do que “1”, o número contido no campo *Valor* será o *offset* (em *bytes*) que deve ser aplicado, a partir do início do arquivo *TIFF*, para iniciar a leitura dos valores específicos para a *Etiqueta* correspondente.

A tabela 1 foi apresentada por Vasconcelos (2002), e mostra uma relação das *Etiquetas* normalmente utilizadas no formato do *TIFF* Básico. Mais detalhes podem ser encontrados também em TIFF - Revision 6.0 (1992).

Tabela 1 – Etiquetas mais utilizadas do formato TIFF. Fonte: VASCONCELOS (2002)

Número	Nome da Etiqueta	Descrição	Exemplos de Utilização
254	NewSubfileType	Normalmente, é a etiqueta inicial do <i>IFD</i> de um arquivo <i>TIFF</i>	
256	ImageWidth	Enumeração = 1 Valor = NP = Número de Pontos ou Pixels por Linha da Imagem (Eixo dos X)	Valor = NP (exemplo de uma imagem com dimensão NP pixels[X] por NL pixels[Y])
257	ImageLength	Enumeração = 1 Valor = NL = Número de Linhas da Imagem (Eixo dos Y)	Valor = NL (exemplo de uma imagem com dimensão NP pixels[X] por NL pixels[Y])
258	BitPerSample	Enumeração = SP (SamplesPerPixel) = Número de Amostras por Pixel da Imagem O significado do Valor vai depender da Enumeração	Se Enumeração = 1, Valor = No. de Bits por Pixel Se Enumeração > 1, Valor = Offset para ler os números de bits de cada Amostra por Pixel
259	Compression	Enumeração = 1 Valor = Código de Compressão dos Dados	Códigos de Compressão dos Dados: 1 = Dados da Imagem sem Compressão 2 = Codificação Huffman Modificada (<i>run length encoding</i>) 3 2733 = Codificação tipo <i>PackBits Compression</i>
262	PhotometricInterpretation	Enumeração = 1 Valor = Código de Tipo de Imagem	Códigos do Tipo de Imagem: 0 = <i>WhiteIsZero</i> (Utilizado em Imagens do Tipo <i>Bilevel, Grayscale, MD T</i>) 1 = <i>BlackIsZero</i> (Utilizado em Imagens do Tipo <i>Bilevel, Grayscale, MD T</i>) 2 = <i>RGB Full Color Image</i> 3 = <i>Palette Color Image</i>
273	StripOffset	Enumeração = N Strips = Número de Faixas (<i>Strips</i>) da Imagem Valor = $Offset$ para se ler os <i>offsets</i> das N Strips da Imagem	N Strips = Função de NL e de RPS $Offset$ = um número variável
277	SamplesPerPixel	Enumeração = 1 Valor = SP = Número de Amostras por Pixel da Imagem	Códigos do Número de Amostras por Pixel: 1 = Imagem do tipo <i>Bilevel, Grayscale</i> ou <i>Palette-Color</i> 3 = Imagem do tipo <i>Full-Color RGB</i>
278	RowsPerStrip	Enumeração = 1 Valor = RPS = Número de Linhas Contidas em cada Faixa (<i>Strip</i>)	Valor = Função de NL e de NP
279	StripByteCounts	Enumeração = N Strips = Número de Faixas (<i>Strips</i>) da Imagem Valor = $Offset$ para ler os Comprimentos (bytes) das N Strips	Enumeração = N Strips = Função de NL e de RPS Valor = $Offset$ para ler os Comprimentos (bytes) das N Strips
282	XResolution	Enumeração = 1 Valor = $Offset$ para ler a Resolução segundo o Eixo dos X	
283	YResolution	Enumeração = 1 Valor = $Offset$ para ler a Resolução segundo o Eixo dos Y	
296	ResolutionUnit	Enumeração = 1 Valor = Unidade de Resolução	Códigos da Unidade de Resolução: 1 = Sem Unidade 2 = Polegada 3 = centímetro
305	Software	Enumeração = N Bytes = Comprimento (em Bytes ou caracteres) Valor = $Offset$ para ler os caracteres que indicam o <i>software</i> que gerou a Imagem	N Bytes = 36 (normalmente) $Offset$ = um número variável

Número	Nome da Etiqueta	Descrição	Exemplos de Utilização
284	PlanarConfiguration	Enumeração = 1 Valor = Código de Armazenamento dos Pixels	Códigos de Armazenamento dos Pixels 1 = <i>Chunky</i> = Armazenamento Contínuo 2 = <i>Planar Format</i> = Armazenado em "Planos Componentes Separados"
306	DateandTime	Enumeração = N Bytes = Comprimento (em Bytes) Valor = $Offset$ para ler os caracteres que exprimem a Data e Hora da Geração da Imagem (Formato AAAA:MM:DD HH:MM:SS)	N Bytes = 20 (normalmente) $Offset$ = um número variável
320	ColorMap	Enumeração = $NPal$ = Total de Valores contidos na Tabela de Cores <i>RGB (ColorMap)</i> , utilizado em imagens do tipo <i>Palette Color</i> Valor = $Offset$ para ler a Tabela, formada por ($NPal/3$) R's, ($NPal/3$) G's, ($NPal/3$) B's.	Enumeração = Função da Variedade de Cores da Imagem Valor = um número variável
339	SampleFormat	Enumeração = SP = Número de Amostras por Pixel da Imagem (=valor da Etiqueta 277) Valor = SF = Código do Formato da Amostra	Códigos do Formato da Amostra: 1 = Inteiro (2 bytes) não-sinalizado 2 = inteiro (2 bytes) sinalizado 3 = Ponto flutuante (4 bytes) 4 = Formato de dados indefinido

D) Segmento OPA (*Outros Parâmetros e Atributos*)

Quando um parâmetro ou atributo de determinada *Etiqueta* exigir mais de um valor numérico para a sua definição, ou for um valor alfanumérico, com vários caracteres no padrão *ASCII*, esses valores ou caracteres são armazenados, normalmente, numa posição física do arquivo *TIFF* imediatamente subsequente à *IFD*. Tais valores compõem o denominado segmento *Outros Parâmetros e Atributos (OPA)*.

Neste segmento, são armazenados determinadas informações obrigatórias (e outras opcionais) correspondentes a algumas *Etiquetas* específicas, tais como os *offsets* (*OffStrip*) para a leitura das faixas (*NStrips*) da imagem, os comprimentos (*StripLen*) – em *bytes* – relativos a cada faixa, bem como as informações alfanuméricas (ASCII), tais como a identificação do *software* que gerou a imagem, a data e hora de geração do arquivo de imagem, entre outros VASCONCELOS (2002).

2.5.3.6 Outros formatos específicos

Em geral, os softwares comerciais de geoprocessamento possuem formatos de imagens que os distinguem dos demais. Alguns destes formatos são encontrados facilmente em outros softwares, permitindo a conversão (importação) para o formato nativo do software que está sendo utilizado. É comum acompanhar o arquivo da imagem um segundo arquivo, de tamanho reduzido (em geral menor que 10 kbytes) trazendo informações sobre algumas características da imagem, tais como: coordenadas de um dos cantos da imagem, tamanho do pixel, número de colunas e linhas, valores máximo e mínimo de CD, sistema de referência, entre outros.

Porém, a documentação específica sobre a formação do arquivo (detalhes de construção) não são encontrados com a mesma facilidade para o público em geral, o que torna muito difícil a tarefa de interpretar um arquivo gerado por estes softwares sem ajuda de programa específico.

Na Tabela 2 são apresentados os formatos nativos de alguns dos softwares de geoprocessamento mais utilizados.

Tabela 2 – Formatos preferenciais de softwares comerciais

Software	Formato Nativo	Arquivo c/ Informações	Fabricante
Idrisi	.RST	.RDC	Graduate School of Geography – Clark University
Envi	.IMG	.TFW, HDR	RSI – Research Systems Inc.
MultiSpec		.STA	Purdue Research Foundation
Erdas	.LAN, .IMG		Leica Geosystems
Spring	.GRB		INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ArcView	.BIL		ESRI - GIS and Mapping Software

2.3 Resoluções das imagens em SR

O termo resolução em sensoriamento remoto se desdobra na verdade em três diferentes (e independentes) parâmetros: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica CROSTA (1993).

2.3.1 Resolução Espacial

Refere-se à habilidade do sistema sensor em distinguir e medir os alvos. Esta habilidade baseia-se na projeção geométrica do detector na superfície terrestre, definindo a sua área do campo de visada do instrumento numa certa altitude e num determinado instante. O ângulo definido por esta projeção é denominado de campo de visada instantânea (*Instantaneous Field Of View, IFOV*). O *IFOV* define a área do terreno focalizada a uma dada altitude pelo instrumento sensor (FLORENZANO, 2002).

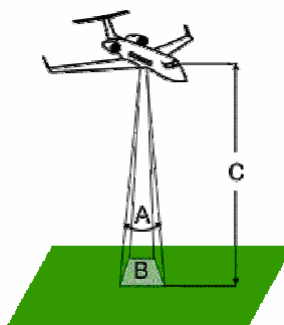


Figura 24: IFOV

A Figura 25 ilustra o contraste visual entre diferentes resoluções em áreas urbanas. Na fotografia aérea com resolução espacial de 0,5 m e a imagem do IKONOS II, de 1 m, ambos considerados de alta resolução, consegue-se verificar a grande quantidade de detalhes e a distinção dos elementos urbanos (casas, ruas, quadras, vegetação, calçadas, loteamentos). A imagem do SPOT 4, com resolução espacial de 10 m é considerada de média resolução, possibilitando identificar elementos urbanos, como a rede viária, aeroportos, indústrias, edifícios. Porém, ao colocar a imagem na mesma escala das imagens de alta resolução, observa-se o tamanho do pixel. Por último, na imagem do Landsat 7, com pixel de 30 m, de baixa resolução, numa escala grande pode-se distinguir alguns elementos urbanos, avenidas e galpões, já na mesma escala de detalhe ocorre o mesmo que com a imagem do SPOT 4. Portanto, quanto maior a resolução espacial, maior o nível de detalhes perceptível na imagem,

desde que o sinal de saída de um detector esteja relacionado com a média da energia radiante dentro da área projetada. (MELO, 2002)

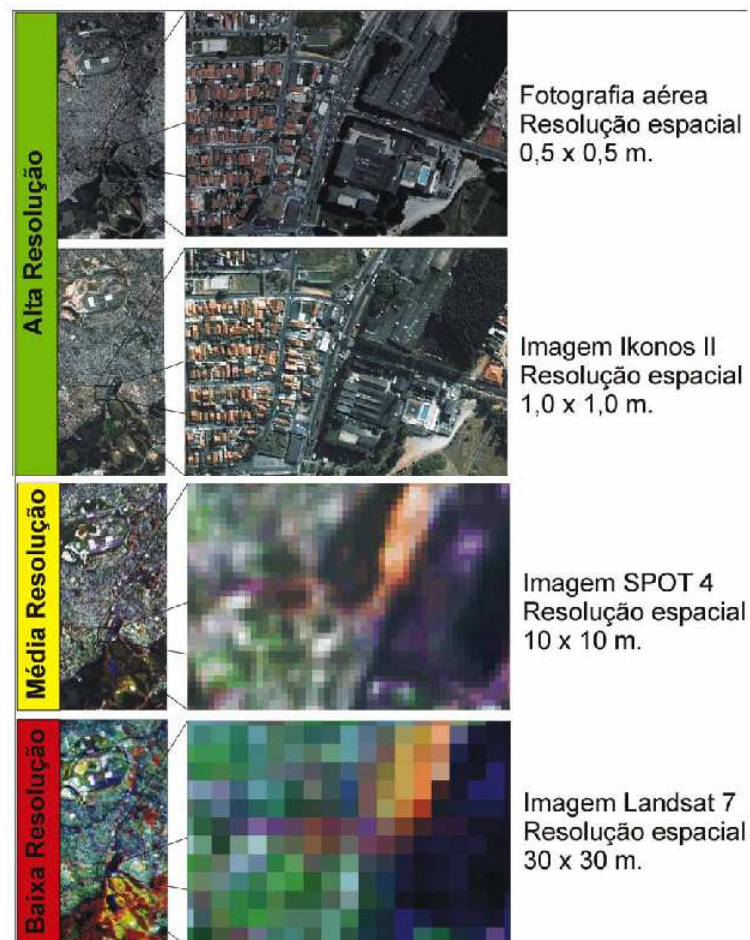


Figura 25: Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais para discriminar áreas urbanas. Fonte: MELO (2002)

2.3.2 Resolução Espectral

Resolução Espectral é um conceito próprio para os sistemas sensores denominados de *multiespectrais*. Segundo Novo (1989), resolução espectral é “*uma medida da largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno*”.

Para uma melhor compreensão deste conceito, Jensen e Jackson (2001) destacam dois pontos importantes: o comprimento de onda detectado pelo sensor e a quantidade de faixas espectrais. A Figura 26.A apresenta as diferentes regiões do espectro eletromagnético utilizadas em sensoriamento remoto, destacando a faixa do visível. A Figura 26.B mostra o comprimento de onda detectado pelas bandas de dois sistemas sensores (vermelho e azul). O

primeiro sistema sensor (vermelho) tem um grande número de bandas espectrais e uma grande sensibilidade espectral. O outro sistema sensor (azul), possui poucas bandas e uma menor sensibilidade espectral. Comparando os dois sistemas sensores, verifica-se que o primeiro pode caracterizar e distinguir melhor um objeto na imagem do que o outro sistema. Portanto, quanto menor o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior a discriminação do alvo na cena e melhor a resolução espectral (MELO, 2002).

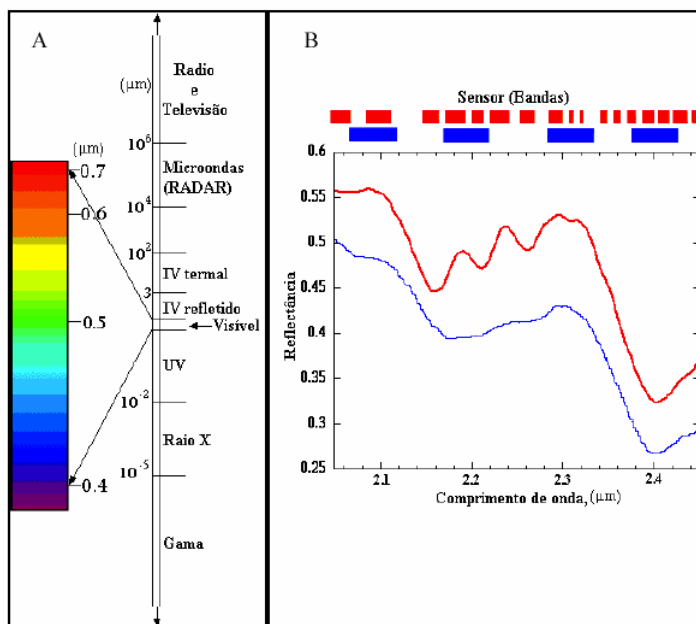


Figura 26: Espectro Eletromagnético (A) e Resolução espectral (B). Fonte: JENSEN e JACKSON (2001).

2.3.3 Resolução Radiométrica

Refere-se à capacidade do sistema sensor em detectar as variações da radiância espectral recebida. A radiância de cada pixel passa por uma codificação digital, obtendo um valor numérico, expresso em bits, denominado de *Número Digital* (ND). Este valor é facilmente traduzido para uma intensidade visual ou ainda a um nível de cinza, localizado num intervalo finito (0, K-1), onde K é o número de valores possíveis, denominados de níveis de quantização (SCHOWENGERDT, 1983).

O número de níveis de cinza está expresso em bits, ou seja, expresso em função do número de dígitos binários necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo de cinza. O seu valor é sempre em potência de 2, por exemplo 8 bits significam $2^8 = 256$ níveis de cinza. As diferenças são maiores nos níveis 2 e 4 do que nos níveis 256 e 2048, devido ao fato do olho humano não possuir sensibilidade às mudanças de intensidade acima de 30 níveis de cinza (Crosta, 1993). A Figura 27 ilustra essa diferença de níveis de cinza.

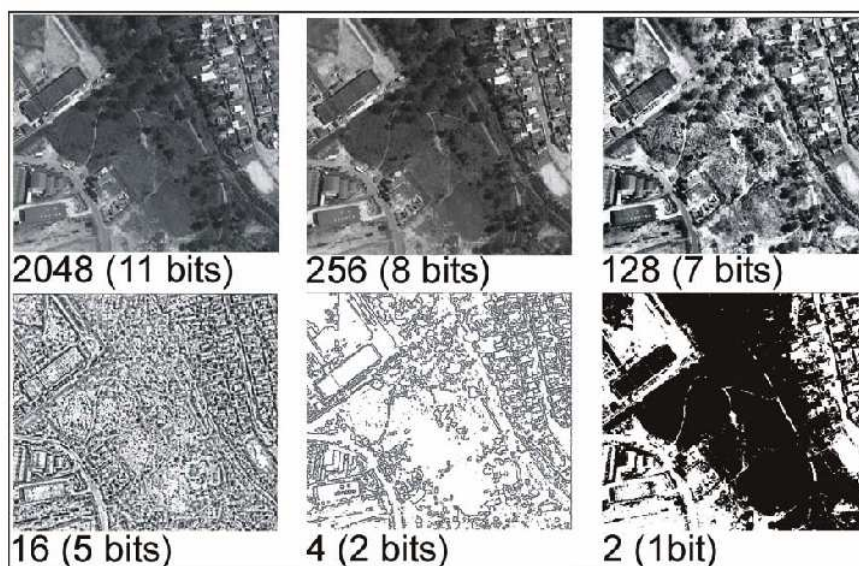


Figura 27: Diferença de resolução radiométrica, em área urbana. Fonte: MELO (2002)

2.3.4 Resolução Temporal

Além de resolução espacial, espectral, e radiométrica, o conceito de resolução temporal é também importante em um sistema de sensoriamento remoto. Refere-se à frequência de passagem do sensor num mesmo local, num determinado intervalo de tempo. Este ciclo está relacionado às características orbitais da plataforma (altura, velocidade, inclinação), e ao ângulo total de abertura do sensor. A resolução temporal é de grande interesse especialmente em estudos relacionados a mudanças na superfície terrestre e no seu monitoramento.

2.4 Processamento Digital de Imagens

Por Processamento Digital de Imagens (PDI) entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996).

Conforme Silva (2001), a função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da

informação contidas nas imagens, para posterior interpretação. Nesse sentido, sistemas dedicados de computação são utilizados para atividades interativas de análise e manipulação das imagens brutas. O resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

A informação de interesse é caracterizada em função das propriedades dos objetos ou padrões que compõem a imagem. Portanto, extrair informação de imagens envolve o reconhecimento de objetos ou padrões. A maior parte dessa atividade requer grande capacidade de cognição por parte do intérprete, devido à complexidade dos processos envolvidos e à falta de algoritmos computacionais precisos o bastante para realizá-lo de forma automática.

Ainda segundo Silva (2001), o sistema visual humano possui uma notável capacidade de reconhecer padrões. Contudo, ele dificilmente é capaz de processar o enorme volume de informação presente numa imagem. Vários tipos de degradações e distorções, inerentes aos processos de aquisição, transmissão e visualização de imagens, contribuem para limitar ainda mais essa capacidade do olho humano.

O objetivo principal do processamento de imagens é o de remover essas barreiras, inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir de imagens. Nesse contexto, o processamento digital deve ser encarado como um estágio preparatório, embora quase sempre obrigatório, da atividade de interpretação das imagens de sensoriamento remoto.

As formas possíveis de manipulação de imagens são teoricamente infinitas. Entretanto, de um modo geral, podem ser categorizadas em um ou mais procedimentos que incluem quatro tipos abrangentes de operações computacionais (QUEIROZ, 2003):

a) Retificação e Restauração de Imagens: operações realizadas para minimizar as distorções e degradações dos dados de uma imagem, com a finalidade de criar uma representação mais fiel da cena.

b) Realçamento de Imagens: procedimentos aplicados aos dados de uma imagem com o objetivo de melhorar efetivamente a visualização da cena, para subsequente interpretação visual.

c) Classificação de Imagens: estas operações têm a finalidade de substituir a análise visual dos dados por técnicas quantitativas de análise automática, visando a identificação das regiões presentes na cena.

d) Combinação de Dados (*data merging*): procedimentos utilizados para combinar os dados de uma imagem, referente a uma certa área geográfica, com outros conjuntos de dados referenciados geograficamente, para a mesma área.

2.4.1 O Histograma de uma Imagem

Conforme Silva (2001), em processamento de imagens, trabalha-se sempre com os tons de cinza (*digital numbers* ou *DNs*) atribuídos aos pixels de uma imagem. O histograma é uma das formas mais comuns de se representar a distribuição dos DN's de uma imagem, e possivelmente a mais útil em processamento digital de imagens. Ele fornece a informação sobre quantos pixels na imagem possuem cada valor possível de DN (que, no caso das imagens de 8 bits, variam de 0 a 255) ou, de forma equivalente, qual a proporção da imagem que corresponde a cada valor de DN.

Os histogramas são também conhecidos como distribuição de intensidades e **Função de Densidade de Probabilidade (PDF)**. Esse último termo advém do fato de que, estatisticamente, o histograma representa, neste caso, a probabilidade de se achar um DN de um dado valor dentro de uma imagem.

Outro ponto importante com relação a histogramas é que eles representam dados digitais, também chamados de discretos. Assim sendo, a distribuição de intensidades é representada por colunas discretas, que não podem ser divididas ou "quebradas", correspondentes a números inteiros (em contraposição a números fracionários). Esse conceito assume importância ao se tratar de realce de contraste em imagens.

Ao se observar o histograma de uma imagem, tem-se uma noção instantânea sobre as características da mesma. A forma do histograma fornece informações de grande importância no caso das imagens de sensoriamento remoto, tais como intensidade média e espalhamento dos valores de DN; este último, por sua vez, dá a medida do contraste de uma imagem: quanto maior o espalhamento ao longo do eixo dos DN's, maior o contraste da imagem (Figura 28).

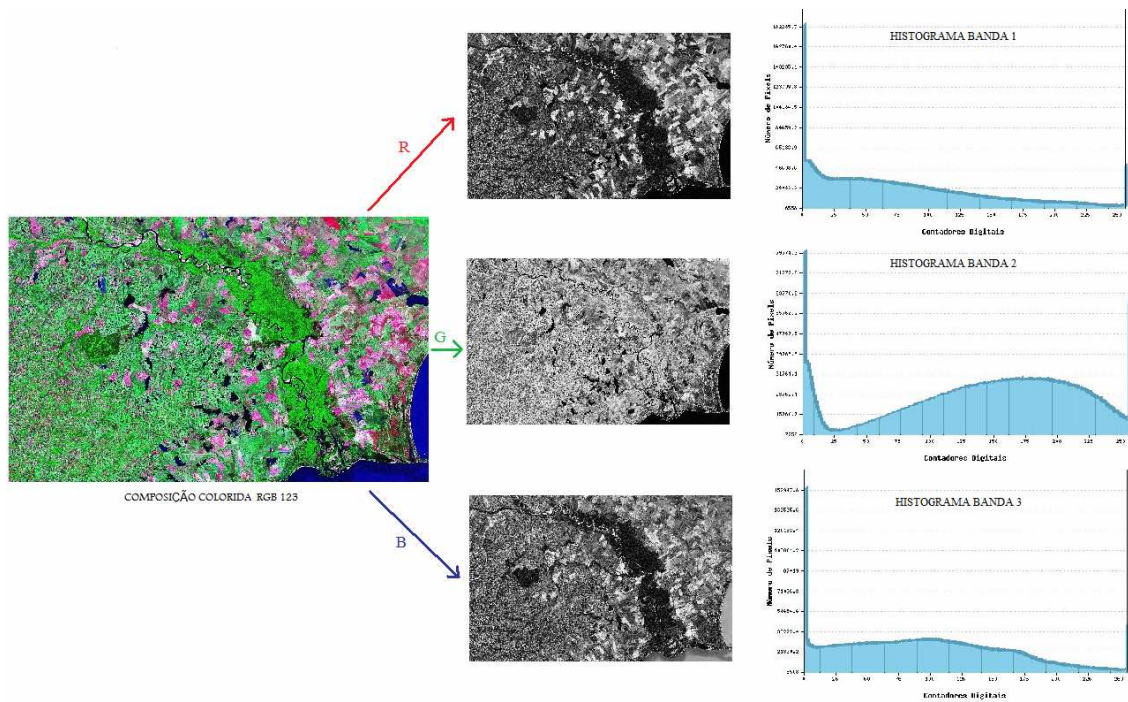


Figura 28: Composição colorida de uma imagem do sensor ETM+ Landsat 7 dos canais 123 com os respectivos histogramas de cada banda.

Histograma Normalizado

O histograma normalizado é dado por:

$$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (2.26)$$

onde $0 \leq r_k \leq 1$

$k = 0, 1, \dots, L-1$, onde L é o número de níveis de cinza da imagem;

n = número total de pixels da imagem;

n_k = número de pixels cujo nível de cinza corresponde à k ;

$P_r(r_k)$ = Probabilidade do K -ésimo nível de cinza;

Histograma Acumulado

O histograma acumulado produz um número de ocorrências de níveis de cinza menores ou iguais às do histograma normalizado, sendo dado por:

$$S_k = \sum_{j=0}^k n_j = \sum_{j=0}^k P_r(r_j) \quad (2.27)$$

onde $0 \leq r_j \leq 1$

Como resultado da função S_k temos valores crescentes de quantidades de tons de cinza, até alcançar o total de pixels da imagem.

2.4.2 Correções Radiométricas

As imagens originais frequentemente apresentam degradações radiométricas, em função de desajustes na calibração dos detectores, erros esporádicos na transmissão dos dados e influências atmosféricas.

A correção radiométrica de imagens visa corrigir estas degradações e é uma das mais importantes fases do processamento digital, pois, caso estas imperfeições não sejam removidas, poderão ser enfatizadas, por exemplo, quando da aplicação da técnica de realce de imagens (apresentada na seção 2.4.4).

As principais correções radiométricas são o "*stripping*" (padrão sucessivo de linhas horizontais que aparecem na imagem, devido, por exemplo, à diferença ou desajuste de calibração dos detectores) e o "*dropedlines*" ou linhas com ausência de informação (padrão horizontal anômalo na imagem que ocorre pela perda de informações quando da gravação ou transmissão defeituosa ou ainda no processamento posterior dos dados).

A atmosfera é outro provocante de degradações nas imagens originais, muitas vezes comprometendo a análise e interpretação destas. A intensidade da influência atmosférica depende do comprimento de onda, ou seja, varia de banda para banda, e a sua correção na imagem pode ser feita a partir de um modelo matemático. Esses modelos matemáticos são de difícil aplicação porque normalmente os parâmetros atmosféricos requeridos no modelo geralmente são desconhecidos. Esses parâmetros devem ser obtidos na hora e data de passagem do satélite por estações meteorológicas com equipamentos de radiossondagem.

Na prática, desenvolvem-se técnicas de correção atmosférica, com bons resultados, principalmente o método do **Mínimo Histograma**, que consiste na identificação, na imagem, de áreas com sombras de relevo, sombras de nuvens ou corpos límpidos d'água, onde se assume que essas áreas possuem radiância zero e os valores de níveis de cinza não nulos

encontrados nesses alvos são considerados provenientes do efeito aditivo do espalhamento atmosférico. O menor valor medido em cada banda espectral nessas áreas é subtraído dos valores digitais de toda a cena, na respectiva banda.

Um outro método alternativo de correção atmosférica é o da **Regressão de Bandas**. Este método assume que entre duas bandas altamente correlacionadas, a equação da reta de melhor ajuste deveria passar pela origem, caso não houvesse efeito aditivo da atmosfera. Porém, devido a este efeito, a reta corta o eixo y em algum ponto maior do que zero. O valor do ponto de interceptação representa o valor adicionado devido a efeitos atmosféricos naquela banda. Esse valor constante da equação da reta é subtraído da banda considerada.

2.4.3 Correções Geométricas

Conforme D'Alge (2001), a primeira razão para a realização de correção geométrica de imagens é a existência de distorções sistemáticas introduzidas durante a aquisição das imagens. Portanto, a correção geométrica trata, prioritariamente, da remoção dos erros sistemáticos presentes nas imagens. Outro aspecto importante são os estudos multi-temporais tão comuns à área de Sensoriamento Remoto. Eles requerem que uma imagem seja registrada com a outra para que se possa interpretar a resposta de ambas para uma certa posição no espaço.

É de fundamental importância para o correto tratamento de uma imagem que sejam conhecidos os erros que interferem no processo de formação das imagens. A partir daí, segue-se a escolha do modelo matemático mais adequado a cada caso.

Os principais fatores que afetam a geometria da imagem são apresentados em D'Alge (2001):

A) Um dos efeitos principais é causado pela rotação da Terra (**skew**), ou seja, pelo movimento relativo entre a Terra e o satélite. Na medida em que o satélite desloca-se para o sul, a Terra gira de oeste para leste, fazendo com que seja necessário compensar o posicionamento das varreduras, que devem ser deslocadas para leste. Por isso as imagens corrigidas apresentam aspecto de paralelogramo.

B) Outro efeito importante são as chamadas **distorções panorâmicas**, que afetam, principalmente, os sensores que trabalham com um campo de visada amplo. A distorção panorâmica é originada pela variação do IFOV (*instantaneous field of view*) dentro do campo

de visada. Como o IFOV corresponde a um ângulo fixo, ele cobre dimensões diferentes no terreno em função da inclinação. Isto faz com que a dimensão coberta no terreno no nadir seja menor que aquela coberta nas bordas da imagem, fazendo com que os pixels das bordas laterais da imagem tenham dimensões maiores que os pixels situados sob a órbita.

C) A **curvatura da Terra** gera um efeito análogo ao anterior. Na verdade, ela acentua o efeito da distorção panorâmica, fazendo com que haja uma compressão de dados maior nas bordas da imagem. Por isso deve ser tratada como parte integrante da distorção panorâmica.

D) Outro efeito que se origina por questões de movimento relativo é o chamado **arrastamento** da imagem durante uma varredura. Este efeito afeta apenas os sensores que operam por varreduras mecânicas, pois o satélite move-se ao longo de sua órbita durante o tempo decorrido para a execução de uma varredura.

E) Somam-se a esses efeitos aqueles oriundos de variações de efemérides do satélite (posição e velocidade) e a de atitude da plataforma:

Row: que afetam a varredura no sentido longitudinal;

Pitch: que provocam distorções transversais no processo de varredura;

Yaw: que provocam distorções semelhantes a um leque na disposição das linhas na imagem.

2.4.3.1 Registro

Em sensoriamento remoto, muitas vezes a análise comparativa de imagens multi-temporais, ou a combinação entre imagens de diferentes sensores sobre uma mesma área, ou ainda a justaposição de imagens se faz necessária. Nestes casos, é preciso assegurar que os pixels das imagens a serem trabalhadas sejam referentes às mesmas áreas no terreno. Mesmo considerando um mesmo sensor, a bordo de um mesmo satélite, dificilmente essa coincidência nos pixels ocorrerá, devido às distorções não sistemáticas causadas pelos movimentos do satélite. Portanto, antes de se combinar/comparar duas imagens de uma mesma área, é necessário que ambas estejam perfeitamente registradas entre si.

Conforme Silva (2001) existe duas maneiras de registrar imagens: o modo automático e o modo manual.

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

O **registro manual** se baseia na identificação de pontos de controle no terreno, sendo indicado para os casos em que uma grande precisão não é necessária. Neste caso, porém, ao invés de registrar as coordenadas em pixel/linha de uma imagem às coordenadas geográficas de um mapa, vai-se registrar duas coordenadas tipo pixel/linha entre si. Segue-se a seguir as etapas de transformação afim e a reamostragem por interpolação, as quais serão descritas na seção 2.7.3.2. O uso de transformações polinomiais do 1º e 2º grau é bastante comum no registro de imagens.

2.4.3.2 Georreferenciamento

O georreferenciamento de uma imagem compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência, em última instância, o sistema de coordenadas planas de uma certa projeção cartográfica. Como qualquer projeção cartográfica guarda um vínculo bem definido com um sistema de coordenadas geográficas, pode-se dizer então que o registro estabelece uma relação entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas usando assim transformações geométricas simples (usualmente transformações polinomiais de 1º e 2º grau) para estabelecer um mapeamento entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas.

O processo de georreferenciamento é fundamental em vários problemas práticos na área de sensoriamento remoto, tais como: integração de uma imagem à base de dados existente num SIG; aplicação na área de cartografia, uso da terra, geografia, que exigem alta precisão geométrica ou fidelidade com respeito à cena, fusão de imagens adquiridas por sensores diferentes, aplicações relacionadas com a combinação de imagens sobre uma grande área (mosaico) e na análise de dados multi-temporais (imagens adquiridas em épocas

diferentes). Para que a precisão cartográfica seja avaliada em imagens de sensoriamento remoto, faz-se necessário que as mesmas sejam corrigidas das suas distorções e os elementos que as constituem fiquem referidos a algum sistema de coordenadas (QUEIROZ, 2003).

De uma maneira geral, o processo de georreferenciamento de imagens compreende três grandes etapas. Começa-se com uma **transformação geométrica**, também denominada mapeamento direto, que estabelece uma relação entre coordenadas de imagem (linha e coluna) e coordenadas geográficas (latitude e longitude). Em seguida faz-se o **mapeamento inverso**, que inverte a transformação geométrica usada no mapeamento direto, permitindo que se retorne à imagem original para que se definam os níveis de cinza que comporão a imagem corrigida. Esta definição de níveis de cinza ocorre na última etapa, chamada de **reamostragem**, que nada mais é que uma interpolação sobre os níveis de cinza da imagem original.

2.4.3.2.1 Transformação geométrica

Conforme apresentado em D'Alge (2001), a transformação geométrica pode ser executada através de três modelos matemáticos distintos: o modelo de correções independentes, o modelo fotogramétrico e o modelo polinomial. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta de cada modelo, enfatizando-se vantagens, desvantagens e aplicabilidades.

a) Modelo de correções independentes

O modelo de correções independentes, como o próprio nome sugere, trata de forma independente as diversas distorções sistemáticas. Tudo é feito no sistema de referência da imagem, onde os pixels são reposicionados de acordo com a modelagem de cada efeito visto de modo isolado. Há duas grandes desvantagens na aplicação desse modelo. Em primeiro lugar, conforme o exemplo mencionado sobre a superposição de duas varreduras consecutivas, há correlações entre as fontes de distorção, de modo que seus efeitos nem sempre são separáveis. Com isso, o resultado da correção geométrica não é muito bom. Além disso, como tudo se passa no sistema de referência da imagem, não se consegue estabelecer uma relação com as coordenadas geográficas sem que haja um procedimento externo.

b) Modelo fotogramétrico

O modelo fotogramétrico inspira-se no uso das equações de colinearidade aplicadas em fototriangulação. Com base nos dados de efemérides do satélite, descobre-se sua posição

no instante de aquisição de um dado pixel. Com as informações da atitude e dos parâmetros do sistema de imageamento, define-se a direção de visada para aquele instante. Tem-se, então, um ponto e uma direção no espaço, os quais definem uma reta. Calcula-se a interseção dessa reta com a figura matemática da Terra, no caso um elipsóide de referência.

Como resultado, chega-se aos valores de latitude e longitude associados ao instante de aquisição de um certo pixel, estabelecendo-se, assim, a relação entre o sistema de referência da imagem e as coordenadas geográficas. O modelo fotogramétrico não faz hipóteses sobre a independência das diversas fontes de erro e permite o cálculo das coordenadas geográficas sem que haja necessidade de um procedimento externo. Deste modo, o referenciamento da imagem a um sistema de projeção cartográfica pode ser feito sem grandes dificuldades.

c) Modelo polinomial

O modelo polinomial consiste de uma função polinomial cujos parâmetros são determinados a partir das coordenadas de pontos homólogos, os quais correspondem a conjuntos de feições da base de dados (x, y) , que também podem ser identificados no sistema de referência (u, v) . Estas feições são chamadas de **pontos de controle**.

Cruzamentos de estradas, pistas de aeroportos e confluência de rios são candidatos naturais a pontos de controle. O número de Pontos de Controle (PC) mínimo para determinação de um polinômio de grau n (sistema de equações determinado, no qual o número de equações coincide com o número de incógnitas a calcular) é dado pela seguinte regra:

$$N^{\circ} PC's = \frac{(n+1) \cdot (n+2)}{2} \quad (2.28)$$

Onde

n : grau do polinômio

Entretanto, como as coordenadas medidas dos pontos de controle estão sujeitas a erros, a prática tem mostrado que o usuário deve escolher no mínimo 6 e 10 pontos para polinômios de 1° e 2° grau, respectivamente, e de maneira que os pontos fiquem bem espalhados dentro da área de trabalho. Isto permite que os coeficientes sejam avaliados, utilizando-se o cálculo de Mínimos Quadrados (apresentado a seguir), conforme citado em Richards (1993).

Supondo que estes dois sistemas de coordenadas possam ser relacionados através de um par de funções de mapeamento f e g , teremos:

$$u = f(x, y) \quad (2.29)$$

$$v = g(x, y) \quad (2.30)$$

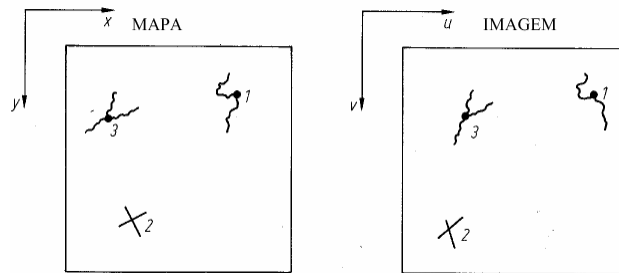


Figura 29: Sistemas de coordenadas para a imagem e o mapa, juntamente com a especificação de pontos de controle no terreno. Fonte: adaptada de RICHARDS (1993)

Uma vez que a forma das funções de mapeamento da Figura 29 não são conhecidas, elas são, geralmente, escolhidas como polinômios simples de primeira, segunda ou terceira ordem (ou grau). Por exemplo, no caso de um polinômio de segundo grau, temos: (ANDRADE, 2000).

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2.31)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (2.32)$$

Se os coeficientes a_i e b_i são conhecidos, então, os polinômios de mapeamento podem ser utilizados para relacionar qualquer ponto do mapa ao seu correspondente na imagem. Quando não se conhecem estes coeficientes, estes podem ser estimados através da identificação dos pontos de controle.

O desempenho deste modelo depende de uma boa distribuição de pontos de controle, da precisão das coordenadas dos pontos de controle e, o mais importante, da adequação da função polinomial escolhida ao que se pretende modelar.

Os coeficientes a_i e b_i (Eq. 2.31 e 2.32), em uma equação do primeiro grau, ou transformação afim no plano, modelam: duas translações, duas rotações e dois fatores de escala, totalizando seis parâmetros.

Ao invés de se utilizar a transformação afim, pode-se escolher modelos menos completos (isto é, que modelam menos parâmetros, porém, que exigem menos pontos de controle), facilitando o esforço computacional do ajustamento por Mínimos Quadrados. Como exemplos, citam-se as transformações isogonal e ortogonal. Polinômios de maior ordem também podem ser empregados, porém, deve-se ter em mente que estes implicarão em maior volume de cálculos, e também em não-linearidade do modelo a ser ajustado (BRITO e COELHO, 2002).

Transformação afim

A transformação afim mantém invariante o paralelismo entre as respectivas linhas da figura, mas já altera sua forma, pois introduz duas escalas (no caso plano), nas direções x e y (Figura 30). A transformação afim é expressa matematicamente por:

$$\begin{cases} X = ax + by + Cx \\ Y = cx + dy + Cy \end{cases} \quad (2.33) \quad (2.34)$$

onde:

X, Y : representam as coordenadas no sistema de referência da Base de Dados (extraídas da carta);

x, y : representam as coordenadas da imagem (pixel);

a, b, c, d, Cx, Cy : representam os parâmetros de transformação a serem determinados, mediante um cálculo de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados.

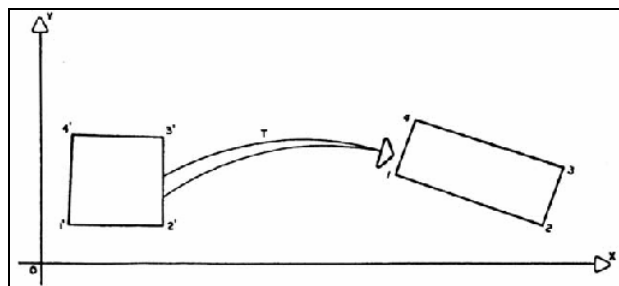


Figura 30: Transformação Afim - Paralelismo invariante. Fonte QUEIROZ (2003)

Método de Ajustamento Paramétrico

No caso de observações diretas, as incógnitas são os valores observados ajustados. Agora, no caso de observações indiretas, para estimar grandezas que se vinculam às observadas; para distingui-las das primeiras é usual designá-las de parâmetros, o que explica a denominação, mais atual, de método paramétrico. Conforme apresentado em Gemael (1984):

Seja:

$$L_a = L_b + V \quad (2.35)$$

Onde

L_b : vetor (n x 1) dos valores observados;

V : vetor (n x 1) dos resíduos;

L_a : vetor (n x 1) dos valores observados ajustados:

$$X_a = X_0 + X \quad (2.36)$$

X_0 : vetor (u x 1) cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros;

X : vetor correção (u x 1);

X_a : vetor dos parâmetros ajustados;

Quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático:

$$L_0 = F(X_a) \quad (2.37)$$

diz-se que o ajustamento se processa pelo **método paramétrico**.

Levando a expressão matricial (2.35) e (2.36) na (2.37) e linearizando o segundo com a *fórmula* de TAYLOR obtém-se:

$$L_b + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_a=X_0} X \quad (2.38)$$

Considerando L_0 como um vetor ($n \times 1$) dos valores das observações calculadas a partir dos parâmetros aproximados e levando no modelo matemático paramétrico obtém-se:

$$L_0 = F(X_0) \quad (2.39)$$

e a matriz das derivadas parciais designada por A :

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_a=X_0} \quad (2.40)$$

pode-se escrever sucessivamente:

$$L_b + V = L_0 + AX \quad (2.41)$$

$$V = AX + L_0 - L_b \quad (2.42)$$

E, finalmente, fazendo:

$$L = L_0 - L_b \quad (2.43)$$

obtém-se o modelo matemático linearizado do método dos parâmetros:

$${}_n V_1 = {}_n A_u \cdot {}_u X_1 + {}_n L_1 \quad (2.44)$$

Minimizando a forma quadrática fundamental obtém-se sucessivamente:

$$\phi = V^t P V = (AX + L)^t \cdot P (AX + L) = \min \quad (2.45)$$

$$\phi = (X^t A^t + L^t) \cdot P (AX + L) = X^t A^t P A X + X^t A^t P L + L^t P A X + L^t P L = \min \quad (2.46)$$

Pode-se observar que o 2 ° e 3 ° termos são iguais, donde:

$$\phi = X^t A^t PAX + 2(X^t A^t PL) + L^t PL = \min \quad (2.47)$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação a X:

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = 2A^t PAX + 2A^t PL = 0 \quad (2.48)$$

$$A^t PAX + A^t PL = 0 \quad (2.49)$$

$$X = -(A^t PA)^{-1} \cdot A^t PL \quad (2.50)$$

Fazendo:

$$N = A^t PA \quad (2.51)$$

$$U = A^t PL \quad (2.52)$$

Resulta

$$NX + U = 0 \quad (2.53)$$

A equação matricial representa um sistema de u equações normais cuja solução é dada pelo vetor:

$$X = -N^{-1}U \quad (2.54)$$

e cujas componentes convergem para os parâmetros aproximados ajustados:

$$X_a = X_0 + X \quad (2.55)$$

Antes do ajustamento necessita-se estimar a precisão das medidas efetuadas para compor a matriz variância-covariância dos valores observados (L_b) e, a partir desta e da variância da unidade peso a priori σ_0^2 , chegar à matriz dos pesos.

$$P = \sigma_0^2 \sum_{L_b}^{-1} \quad (2.56)$$

Após o ajustamento pode-se estimar a variância da unidade de peso a posteriori e a matriz variância-covariância das variáveis envolvidas no processo: X, X_a, V, L_a .

A matriz variância-covariância dos resíduos pode ser expressa matematicamente da forma seguinte:

$$\sum_v = \sigma^2 (AN^{-1}A^t - P^{-1}) \quad (2.57)$$

Com a expressão abaixo,

$$\sigma_0^{\wedge 2} = \frac{V^t PV}{S} \quad (2.58)$$

pode-se estimar a variância da unidade de peso *a posteriori*. O número de observações superabundantes é dado por:

$$S = n - u \quad (2.59)$$

resultando para o caso paramétrico

$$\sigma_0^{\wedge 2} = \frac{V^t PV}{n - u} \quad (2.60)$$

A variância *a priori* repercute sobre a matriz N dos coeficientes das equações normais, circunstância que pode ser explorada, por exemplo, no caso de mau condicionamento.

Deve-se aplicar um teste de hipótese baseado na distribuição de χ^2 para constatar se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança. Uma resposta positiva indica que existem problemas no ajustamento. Estes problemas serão descritos a seguir.

A forma quadrática $V^T \Sigma_{Lb}^{-1} V$ tem distribuição de χ^2 com $v = n - u$ graus de liberdade, isto é:

$$V^T \sum_{L_b}^{-1} V \approx \chi^2(v) \quad (2.61)$$

Logo,

$$\frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \approx \chi^2(v) \quad (2.62)$$

ou, utilizando a:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} S \approx \chi^2(v) \quad (2.63)$$

Testa-se a hipótese bilateral:

$$H_0 \therefore \sigma^2 = \sigma_0^2 \quad (2.64)$$

contra a hipótese alternativa:

$$H_1 \therefore \sigma^2 \neq \sigma_0^2 \quad (2.65)$$

compara-se o valor calculado:

$$\chi^{*2} = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} S = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (2.66)$$

com valores teóricos

$$\chi^2_{v,\infty/2} < \chi^{*2} < \chi^2_{v,1-\infty/2} \quad (2.67)$$

No caso da relação de desigualdade (2.67) não se verificar a hipótese básica H_0 deve ser rejeitada e a hipótese alternativa H_1 aceita. Nesta situação, deve-se proceder a uma análise cuidadosa do ajustamento e uma das seguintes situações isoladamente ou em conjunto podem estar a ocorrer (GEMAEL, 1984):

- 1) As ponderações das observações estão inadequadas;
- 2) Há erros grosseiros ou sistemáticos nas observações gerando resíduos excessivamente grandes;
- 3) O sistema ser mal condicionado; e,
- 4) As expressões matemáticas não expressam a realidade física do problema;

Para solucionar o problema das ponderações inadequadas deve-se fazer uma avaliação das técnicas usadas nas medições, na obtenção das medidas, os erros médios quadráticos e a resolução instrumental. Ao se verificar que há novos valores para as ponderações de algumas observações então, deve-se fazer as correções necessárias.

2.4.3.2.2 Mapeamento Inverso

Se o mapeamento direto é executado pela transformação geométrica T , o mapeamento inverso fica definido pela transformação T^{-1} . A Figura 31 ilustra essa relação entre os mapeamentos direto e inverso. O mapeamento inverso se faz necessário porque o mapeamento direto apenas define a geometria e o espaço geográfico da imagem corrigida. Os níveis de cinza que compõem a imagem corrigida residem na imagem de entrada.

Baseado fortemente na idéia de otimização computacional, o mapeamento inverso recupera a informação sobre os níveis de cinza que definirão o valor a ser associado a uma certa posição na imagem corrigida. É um procedimento imprescindível para a realização da última etapa da correção geométrica, descrita a seguir. D'ALGE (2001)

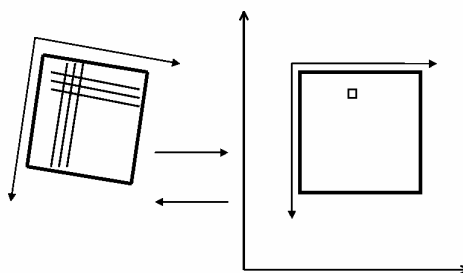


Figura 31: Relação entre os mapeamentos direto e inverso. Fonte: QUEIROZ (2003)

2.4.3.2.3 Reamostragem/Interpolação

A reamostragem é a última etapa do processo do georreferenciamento. Ela usa a informação sobre níveis de cinza conseguida pelo mapeamento inverso e realiza uma interpolação para definir os valores de nível de cinza que comporão a imagem corrigida. O grande problema da reamostragem encontra-se na determinação exata do tom de cinza a ser destinado aos pixels da nova imagem.

Conforme exemplo da Figura 32, a imagem original encontra-se com seu *grid* de pixels em vermelho-escuro. Já a nova imagem (corrigida) encontra-se representada através do quadriculado azul-marinho sobreposto. Essa representação gráfica demonstra claramente o problema decorrente da transformação utilizada para retificar uma imagem e os inconvenientes decorrentes dos eventuais resultados a serem obtidos. Neste caso, vê-se que o pixel destacado na imagem original (coluna 430, linha 289) deve influenciar radiometricamente ao menos outros quatro da imagem retificada (colunas 427 e 428 e linhas 288 e 289). A reamostragem, neste caso, faz-se necessária para que os novos pixels tenham a cor que deveriam ter por estarem em tal posição. BRITO e COELHO (2002).

Vários métodos então, foram desenvolvidos para realizar esta correspondência. Os mais utilizados são: vizinho mais próximo, interpolação bilinear, *splines* bicúbicas e polinômios de Lagrange, conforme citado em (ANDRADE, 1998).

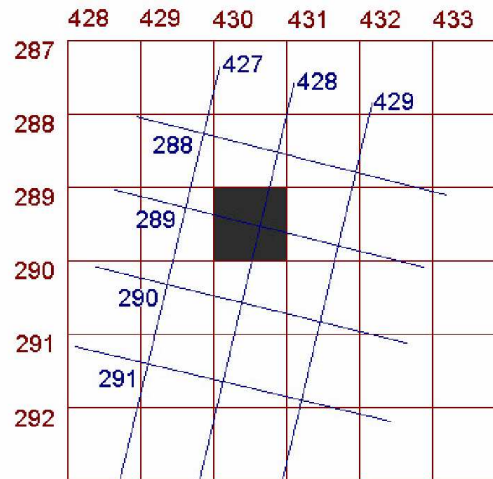


Figura 32: O problema da reamostragem: compatibilizar a radiometria da imagem original para uma nova distribuição de pixels. Fonte: BRITO e COELHO (2002)

Os métodos citados podem ainda ser divididos em dois grupos de acordo com a quantidade de pixels utilizadas no processo, sendo caracterizados pela utilização de uma “janela” de 2x2 ou 4x4 pixels.

A) Métodos de Vizinhança 2x2 Pixels

Reamostragem Por Vizinho Mais Próximo

Este método apenas atribui o valor do nível de cinza de determinado pixel da imagem reamostrada ao pixel da imagem original que estiver mais próximo. Trata-se então, apenas de um arredondamento. Este método possui 0,5 pixel de erro, e isso leva a descontinuidades na imagem reamostrada. Algumas de suas vantagens, segundo (Novo, 1989) são seu rápido processamento e fácil implementação. Além disso, esta reamostragem não altera os valores radiométricos da imagem original.

Andrade (1998) apresenta tal método na forma de equações, de modo a facilitar a pronta utilização em implementações computacionais, as quais são apresentadas a seguir:

$$\begin{cases} A'(k,l) = A(i,j) & \text{para } dx < 0,5 \text{ \& } dy < 0,5 \\ A'(k,l) = A(i+1,j) & \text{para } dx \geq 0,5 \text{ \& } dy < 0,5 \\ A'(k,l) = A(i,j+1) & \text{para } dx < 0,5 \text{ \& } dy \geq 0,5 \\ A'(k,l) = A(i+1,j+1) & \text{para } dx \geq 0,5 \text{ \& } dy \geq 0,5 \end{cases} \quad (2.68)$$

Onde

A' : valor reamostrado do pixel;

A : valor do pixel na imagem original;

dx e dy : são os valores calculados, em números reais, das coordenadas definidoras da posição de um pixel (na imagem a ser reamostrada) e os seus valores inteiros menores.

Esta notação será empregada também nas equações para os outros métodos de interpolação.

Reamostragem por Interpolação Bilinear

O método da interpolação bilinear toma por base os valores de cinza dos quatro vizinhos mais próximos ao centro do novo pixel (imagem retificada), utilizando uma “janela” de dimensão 2 x 2 para calcular a intensidade final do valor de cinza do pixel, é calculada a média ponderada das distâncias dos centros dos 4 pixels ao centro do pixel de saída (Eq. 2.69). O cálculo do valor de cinza (pixel de saída) é dado pela distância entre dois pixels (de entrada), que é efetuada uma aproximação por uma equação linear.

Com este método, segundo Novo (1989), haverá uma maior precisão geométrica e o desaparecimento de descontinuidades. Entretanto, há que se considerar o maior processamento de cálculos e a alteração dos valores de níveis de cinza da imagem original.

Segue a fórmula contida em (Andrade, 1998).

$$\begin{aligned} A'(k, l) = & A(i, j) + \\ & + dx \cdot (A(i+1, j) - A(i, j)) + \\ & + dy \cdot (A(i, j+1) - A(i, j)) + \\ & + dx \cdot dy \cdot (A(i, j) - A(i+1, j) - A(i, j+1) + A(i+1, j+1)) \end{aligned} \quad (2.69)$$

B) Métodos de Vizinhança 4x4 Pixels

Conforme Brito e Coelho (2002) estes métodos apresentam um resultado de melhor visualização, incorrendo em menos erros de interpolação. Entretanto, recaem em cálculos muito mais complexos, uma vez que utilizam cálculos envolvendo os tons dos 16 pixels vizinhos, além de terem, obviamente, a modificação dos tons da imagem original.

Andrade (1998) apresenta as formulações para os métodos de *splines* bicúbicas e polinômio de Lagrange. As mesmas são transcritas a seguir.

Reamostragem por *splines* bicúbicas:

Primeiro, define-se uma função $df(x)$:

$$\begin{aligned} df(x) &= |x|^3 - 2 \cdot |x|^2 + 1, & \text{para } |x| < 1 \\ df(x) &= -|x|^3 + 5 \cdot |x|^2 - 8 \cdot |x| + 4, & \text{para } 1 \geq |x| < 2 \\ df(x) &= 0 & \text{para } |x| > 2 \end{aligned} \tag{2.70}$$

E uma outra função $a(n)$:

$$\begin{aligned} a(n) &= A(i-1, j+n-2) \cdot df(dx+1) + \\ &+ A(i, j+n-2) \cdot df(dx) + \\ &+ A(i+1, j+n-2) \cdot df(dx-1) + \\ &+ A(i+2, j+n-2) \cdot df(dx-2) \quad \text{para } n = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \tag{2.71}$$

Por fim, $A'(k, l)$ equivale a:

$$\begin{aligned} A'(k, l) &= a(1) \cdot df(dy+1) + \\ &+ a(2) \cdot df(dy) + \\ &+ a(3) \cdot df(dy-1) + \\ &+ a(4) \cdot df(dy-2) \end{aligned} \tag{2.72}$$

Reamostragem por Polinômio de Lagrange:

$$\begin{aligned} a(n) &= A(i-1, j+n-2) \cdot (dx-1) \cdot (dx-2) \cdot \frac{dx}{(-6)} + \\ &+ A(i, j+n-2) \cdot (dx+1) \cdot (dx-1) \cdot \frac{(dx-2)}{2} + \\ &+ A(i+1, j+n-2) \cdot (dx+1) \cdot (dx-2) \cdot \frac{dx}{(-2)} + \\ &+ A(i+2, j+n-2) \cdot (dx+1) \cdot (dx-1) \cdot \frac{dx}{6} \quad \text{para } n = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \tag{2.73}$$

$$\begin{aligned}
A(k,l) = & a(1) \cdot (dy - 1) \cdot (dy - 2) \cdot \frac{dy}{(-6)} + \\
& + a(2) \cdot (dy + 1) \cdot (dy - 1) \cdot \frac{(dy - 2)}{2} + \\
& + a(3) \cdot (dy + 1) \cdot (dy - 2) \cdot \frac{dy}{(-2)} + \\
& + a(4) \cdot (dy + 1) \cdot (dy - 1) \cdot \frac{dy}{6}
\end{aligned}
\tag{2.74}$$

Ainda em Andrade (1998) é apresentado um quadro comparativo quanto aos erros e número de operações matemáticas envolvidos nos quatro processos apresentados. Esta informação está contida na Tabela 3.

Tabela 03 - Métodos de reamostragem. Fonte: ANDRADE (1998)

<i>Método</i>	<i>Vizinhança</i>	<i>Operações de adição e multiplicação</i>	<i>Erros de interpolação</i>
Vizinho mais Próximo	1x1	1	15,70%
Interpolação Bilinear	2x2	8	3,70%
Splines Bicúbicas	4x4	110	0,30%
Polinômio de Lagrange	4x4	80	quase 0

Um terceiro método de reamostragem por vizinhança de 16 pixels é a Convolução Cúbica.

Interpolação por Convolução Cúbica

Neste método os 16 pixels mais próximos (janela 4x4) são levados em consideração e a interpolação é realizada ajustando polinômios cúbicos a cada coluna, para depois interpolar um novo polinômio cúbico a estes resultados.

A imagem típica produzida por convolução cúbica apresenta um aspecto visual mais atrativo do que as outras, porém os dados são alterados mais drasticamente do que através de outros métodos. Também é o método mais preciso espacialmente quando se pretende trabalhar com imagens de diferentes resoluções, possuindo, porém a solução mais complexa.

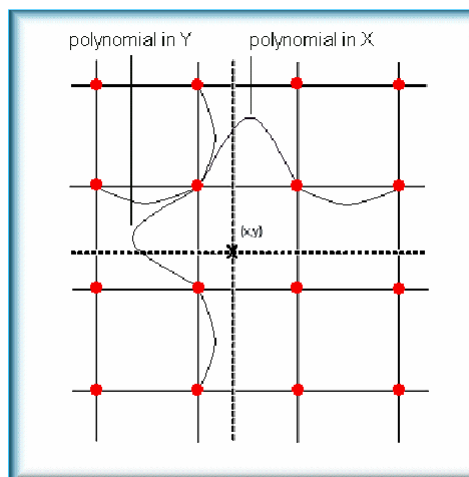


Figura 33: Interpolação por Convolução Cúbica.

2.4.4 Realçamento e Suavização de Imagens

Os principais objetivos do realce de imagens digitais são melhorar a qualidade visual geral da imagem digital, aumentando-se o contraste entre os elementos apresentados na imagem e realçar características específicas relacionadas aos alvos imageados. O **contraste** entre dois objetos pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios.

A manipulação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada "pixel", com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Realiza-se a operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança. Esta transferência radiométrica é realizada com ajuda de histogramas, que são manipulados para obter o realce desejado (SPRING, 1996).

As diversas técnicas de realce de imagens dividem-se em dois tipos de operações: pontual e local. O primeiro é caracterizado pela **manipulação do histograma** da imagem, e depende somente do nível de cinza do pixel. Na segunda operação (local), o novo valor do pixel depende dos valores de seus vizinhos e inclui **técnicas de filtragem, detecção de bordas e interpolação** (JENSEN, 1986).

2.4.4.1 Técnicas de Manipulação de Histogramas

Entre as técnicas que fazem uso da manipulação do histograma da imagem podemos citar o *Stretch*, a *Equalização* e o *Matching*, que serão detalhadas a seguir.

2.4.4.1.1 Stretch do Histograma

É freqüente obter-se imagens com baixo contraste em situações que envolvem iluminação não uniforme ou de baixa intensidade ou ainda devido a deficiências do sensor de visão. A operação de *stretching*, ou espalhamento de contraste, visa uniformizar a distribuição das raias de um histograma de forma que elas preencham toda a faixa do espectro de cinza. Por exemplo, uma imagem com radiometria codificada com 8 bits , terá os seus valores de radiometria originais transformados para a faixa de valores entre 0 e 255.

A) Stretch Linear

O aumento de contraste por uma transformação linear é a forma mais simples de *Stretch*. A função de transferência é uma reta e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de intersecção com o eixo X (Figura 34). A inclinação controla a quantidade de aumento de contraste e o ponto de intersecção com o eixo X controla a intensidade média da imagem final (SPRING, 1996).

A função de mapeamento linear pode ser representada por:

$$Y = AX + B \quad (2.75)$$

Onde

Y: novo valor de contador digital;

X: valor original de contador digital;

A: inclinação da reta (tangente do ângulo);

B: fator de incremento, definido pelos limites mínimo e máximo fornecidos pelo usuário.

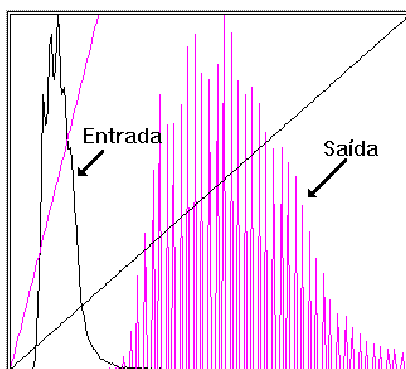


Figura 34: Exemplo de Stretch Linear. Fonte: ENVI (2000)

No aumento linear de contraste as barras que formam o histograma da imagem de saída são espaçadas igualmente, uma vez que a função de transferência é uma reta. Como podemos observar na figura acima, o histograma de saída será idêntico, em formato, ao histograma de entrada, exceto que ele terá um valor médio e um espalhamento diferentes.

B) Stretch Raiz Quadrada

Utiliza-se a opção de transformação por raiz quadrada para aumentar o contraste das regiões escuras da imagem original. A função de transformação é representada pela curva, como mostra a Figura 35. Observe que a inclinação da curva é tanto maior quanto menores os valores de níveis de cinza.

Pode ser expresso pela função:

$$Y = A \cdot \sqrt{X} \quad (2.76)$$

Onde

Y: nível de cinza resultante

X: nível de cinza original

A: fator de ajuste para os níveis de saída ficarem entre 0 e 255

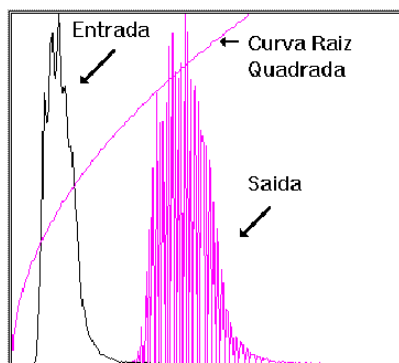


Figura 35: Exemplo de Stretch Raiz Quadrada. Fonte: ENVI (2000)

NOTA: Este mapeamento difere do logarítmico porque realça um intervalo maior de níveis de cinza baixos (escuros), enquanto o logarítmico realça um pequeno intervalo.

C) Stretch Quadrado

Utiliza-se este mapeamento quando se deseja aumentar o contraste de feições claras (altos níveis de cinza da imagem). Observe na Figura 36 que o aumento de contraste é maior a partir da média do histograma, mesmo havendo um deslocamento geral para a região de níveis mais escuros.

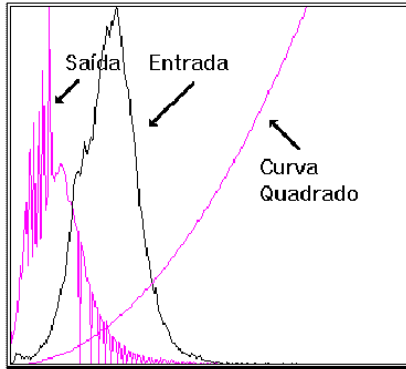


Figura 36: Exemplo de Stretch Quadrado. Fonte: ENVI (2000)

A função de transformação é dada pela equação:

$$Y = A \cdot X^2 \quad (2.77)$$

Onde

X : nível de cinza original

Y : nível de cinza resultante

A : fator de ajuste para os níveis de saída estarem entre 0 e 255

D) Stretch Logarítmo

O mapeamento logarítmico de valores de níveis de cinza é útil para aumento de contraste em feições escuras (valores de cinza baixos). Equivale a uma curva logarítmica como mostrado na figura a seguir.

A função de transformação é expressa pela equação:

$$Y = A \cdot \log(X + 1) \quad (2.78)$$

Onde

Y: novo valor de nível de cinza

X: valor original de nível de cinza

A: fator definido a partir dos limites mínimo e máximo da tabela, para que os valores estejam entre 0 e 255.

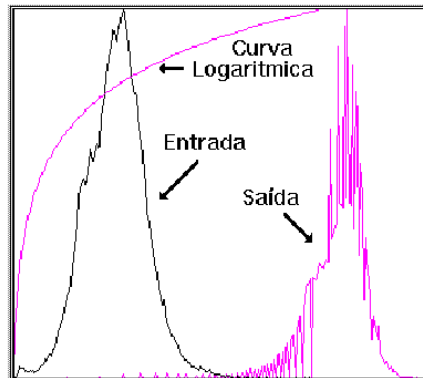


Figura 37: Exemplo de Stretch Logarítmico. Fonte: ENVI (2000)

E) Stretch Negativo

É uma função de mapeamento linear inversa, ou seja, o contraste ocorre de modo que as áreas escuras (baixos valores de nível de cinza) tornam-se claras (altos valores de nível de cinza) e vice-versa. A figura 38 mostra sua representação.

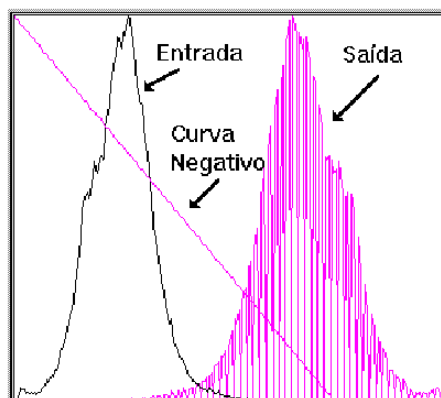


Figura 38: Exemplo de Stretch Negativo. Fonte: ENVI (2000)

A função de mapeamento negativa pode ser representada por:

$$Y = -(A \cdot X + B) \quad (2.79)$$

Onde

Y: novo valor de nível de cinza

X: valor original de nível de cinza

A: inclinação da reta (tangente do ângulo)

B: fator de incremento, definido pelos limites mínimo e máximo fornecidos pelo usuário.

2.4.4.1.2 Equalização do Histograma

A Equalização tem como objetivo obter a máxima variância do histograma de uma imagem, obtendo assim uma imagem com o melhor contraste.

Esta operação aproxima o histograma da imagem original para um histograma uniforme, calculando o seu histograma acumulado e utilizando este como função de intensidade.

A opção de equalização parte do princípio que o contraste de uma imagem seria otimizado se todos os 256 possíveis níveis de intensidade fossem igualmente utilizados ou, em outras palavras, todas as barras verticais que compõem o histograma fossem da mesma altura. Obviamente isso não é possível devido à natureza discreta dos dados digitais de uma imagem de sensoriamento remoto. Contudo, uma aproximação é conseguida ao se espalhar os picos do histograma da imagem, deixando intocadas as partes mais “chatas” do mesmo.

Como pode-se observar na Figura 39, esse processo é obtido através de uma função de transferência que tenha uma alta inclinação toda vez que o histograma original apresentar um pico, e uma baixa inclinação no restante do histograma. (SPRING, 1996)

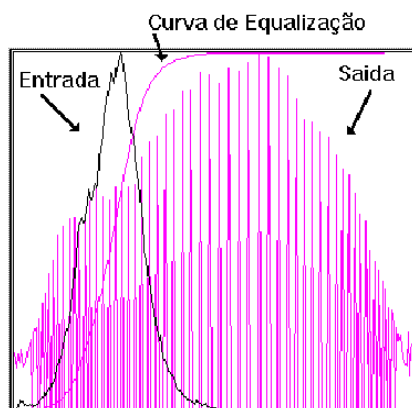


Figura 39: Exemplo de Equalização do histograma. Fonte: ENVI (2000)

A Equação (2.80), encontrada em Richards (1993), expressa a função para a equalização de histograma:

$$y = f(x) = \frac{L-1}{N} \int h_i(x) dx \quad (2.80)$$

Onde

y : contador digital na imagem de saída;

$f(x)$: função de transformação da imagem original para a imagem equalizada;

L : número total de CD's disponíveis

N : número total de pixels na imagem

$\int h_i(x)dx$: número de pixels no histograma acumulado

2.4.4.1.3 Matching

Este método é utilizado sempre que possuímos duas imagens de um mesmo local ou duas cenas uma ao lado da outra. Estas imagens podem ter sido tomadas em épocas, estações do ano e horários distintos, fazendo com que não possuam o mesmo brilho, para um mesmo alvo.

Se visualizarmos as curvas de histograma de cada uma das imagens, notaremos que cada uma tem um histograma próprio, ou seja, uma curva é diferente da outra. O *Matching*, ou Ajuste de Histograma, compara os histogramas acumulados da imagem de entrada com a imagem de referência, tentando igualar as curvas dos histogramas das duas imagens.

Conforme Polidório et. Al. (2005), nestes métodos é assumido que os histogramas de reflectância de superfície de regiões claras e brumosas são os mesmos. Depois de identificar setores claros, os histogramas de regiões nebulosas são deslocados para emparelhar com os histogramas dos setores de referência formada pelas regiões claras. Porém, a suposição principal não é válida quando as composições relativas de objetos diferentes e suas respectivas reflectâncias forem diferentes. Este método também não trabalha bem se a distribuição espacial de aerossóis densos variar dramaticamente. Se a cena é dividida em muitos segmentos pequenos, realizar o matching entre os histogramas se torna uma tarefa muito difícil, quase improvável.

2.4.4.2 Técnicas Envolvendo uma Vizinhança

Segundo Crosta (1993), em uma imagem qualquer de sensoriamento remoto, considerada em uma de suas bandas espectrais, observa-se que a intensidade de cinza, representada pelos DN's dessa imagem, varia bastante em função da distância. Ao se plotar

essas variações em um gráfico como o da Figura 40 obtém-se geralmente uma curva complexa (Figura 40a). Essa curva, por sua vez, pode ser decomposta em um conjunto de componentes senoidais (Figura 40b), com diferentes frequências e amplitudes.

Essas senóides fornecem uma idéia da **distribuição espacial de frequência** da imagem considerada. Nos gráficos da Figura 40, um caso hipotético é mostrado, em apenas uma dimensão, mas nas imagens de Sensoriamento Remoto esse fenômeno é bidimensional.

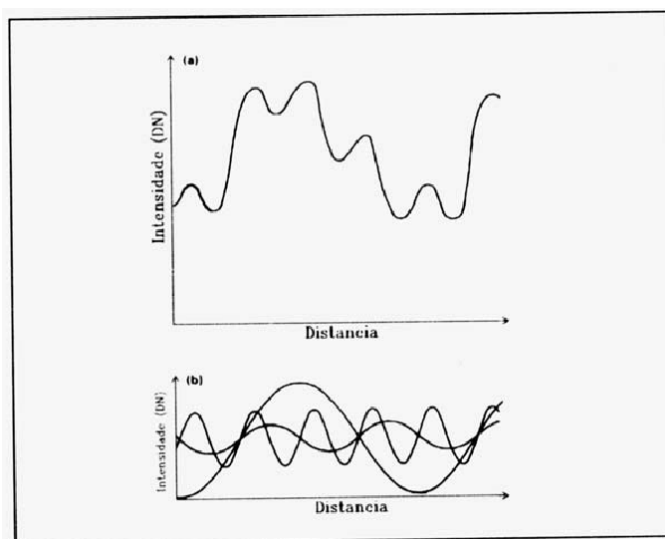


Figura 40: As variações de DN ao longo de uma linha de uma imagem (a) podem ser expressa como várias componentes senóides (b), com diferentes amplitudes e frequências. (Fonte: QUEIROZ, 2003, adaptada de DRURY, 1989).

Todas as imagens possuem limites entre áreas com diferentes respostas em relação à energia eletromagnética. Esses limites podem ser, por exemplo, entre diferentes coberturas do terreno (solo, vegetação, rocha), ou podem representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação, devido ao sombreamento topográfico. Em uma imagem monocromática, esses limites representam portanto, mudanças de um intervalo de DN's para outro. Ao se plotar esses limites em um gráfico como o da Figura 40, eles serão representados por um gradiente bastante inclinado, podendo chegar a vertical. Limites deste tipo são conhecidos como **bordas**.

Eles ocupam geralmente áreas pequenas na imagem, sendo mais estreitos do que largos. Por variarem bastante em áreas pequenas, são chamados de **feições de alta frequência**, sendo representados na figura 40a pelas senóides de pequena amplitude. Exemplos desse tipo de feição são limites entre diferentes tipos de plantações, entre áreas sombreadas e iluminadas, redes de transporte (malha urbana, rodovias, ferrovias), redes de drenagem, estruturas geológicas (falhas, fraturas) e outras.

Já limites gradacionais, que variam mais uniformemente com a distância, sendo conseqüentemente menos nítidos, são chamados de **feições de baixa freqüência**. Estes são representados pelas senóides de grande amplitude na Figura 40b. Exemplos de feições de baixa freqüência são dados por áreas monotonamente uniformes em imagens, tais como uma grande área de monocultura em terreno plano.

A enorme mistura de freqüências em uma imagem dificulta sobremaneira a interpretação de feições com freqüências específicas. Para contornar esse problema e melhorar a aparência da distribuição espacial das informações, são utilizadas técnicas de **filtragem espacial de freqüências**. Estas consistem em realçar seletivamente as feições de alta, média ou baixa freqüência que compõem as imagens de sensoriamento remoto. (QUEIROZ, 2003).

2.4.4.2.1 Filtros no Domínio Espacial

O uso de filtros digitais no domínio espacial, tem como conseqüência a variação no valor digital de um *pixel* da cena original, segundo a influência de seus *pixels* vizinhos, a qual é função dos valores positivos, negativos ou nulos fornecidos pelo usuário e atribuídos ao conjunto de *pixels* que formam a “máscara” ou “janela” do filtro utilizado, a qual é deslocada sobre a imagem linha a linha, coluna a coluna. Através da combinação dos valores de entrada ou pesos, se promoverá um maior ou menor realce da cena, segundo as direções preferenciais de interesse (PARADELLA, 1990).

Podem ser geradas máscaras de quaisquer dimensões, e para uma máscara de dimensões M x N pixels, o resultado para o pixel (*i, j*) da imagem será:

$$r(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(m, n) \cdot t(m, n) \quad (2.81)$$

onde (*m, n*) é o valor de brilho do pixel, endereçado de acordo com a posição da máscara, e *t(m, n)* é a máscara de entrada para esta localização.

Freqüentemente, os pesos de entrada da máscara são conhecidos como “semente” de máscara, e o processo em si é denominado convolução, em vista de sua similaridade com a convolução no domínio temporal da teoria dos sistemas lineares.

2	2	2	3	4	2	0	1	1
2	2	3	4	4	3	1	2	1
2	3	4	4	4	1	4	3	2
3	4	4	4	4	5	3	3	2
3	4	4	4	3	2	6	3	3
2	3	3	3	2	5	2	3	2
2	2	2	2	2	1	1	2	4
2	2	2	1	1	1	1	2	2
2	2	1	1	1	1	1	1	1

Figura 41: Exemplo de uma “máscara” sobre os pixels de uma imagem.

Os realces geométricos de maior interesse em Sensoriamento Remoto referem-se à suavização (*smoothing*), detecção e realce de bordas e detecção de linhas e filtros direcionais.

Filtros de Suavização (passa baixas)

Todo filtro de suavização tem por consequência a redução das frequências altas, produzindo uma homogeneização geral da cena, podendo ter graus diferentes de efeito, dependendo dos pesos usados na janela de convolução e principalmente do tamanho desta janela.

Na Figura 42 são apresentados dois exemplos de filtros passa baixa, sendo (a) média simples e (b) média ponderada, em função da distância dos elementos da janela, em relação ao pixel central.

$$\frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad \frac{1}{18} \cdot \begin{bmatrix} 1,5 & 2,0 & 1,5 \\ 2,0 & 4,0 & 2,0 \\ 1,5 & 2,0 & 1,5 \end{bmatrix}$$

(a) (b)

Figura 42: Filtros de suavização.

Filtros de Aguçamento e Detecção de Bordas (passa altas)

Ao contrário do filtro de suavização, os filtros de aguçamento procuram realçar (aumentar) as pequenas diferenças locais, associadas às frequências espaciais altas. Filtros de detecção de bordas procuram “apagar” as frequências baixas (variações graduais) e deixarem apenas as frequências altas (variações abruptas).

Na Figura 43 são apresentados três exemplos de filtros de **aguçamento**: (a) e (b) são filtros lineares, onde a soma dos pesos é igual a 1, o que significa que a imagem original é

mantida; (c) é um filtro não-linear (Sobel) que pode combinar as frequências altas em várias direções (tipicamente 2 ou 4) para se produzir um efeito visualmente melhor.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \sqrt{\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}^2 + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^2} \\
 (a) \textit{Laplace} & (b) \textit{Aguçar} & (c) \textit{Sobel}
 \end{array}$$

Figura 43: Filtros de aguçamento.

A seguir são apresentados dois tipos de filtros de **detecção de bordas** (Figura 44), os quais são filtros passa altas “falsos” no sentido de não controlarem bem as frequências espaciais que são “apagadas”. Nos filtros lineares deste tipo a soma dos pesos é sempre igual à zero, significando que as variações graduais serão eliminadas, mantendo-se as somente as “bordas”.

$$\begin{array}{cc}
 \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\
 (a) \textit{Laplace} & (b) \textit{Aguçar}
 \end{array}$$

Figura 44: Filtros de detecção de bordas.

Filtros Direcionais

Estes filtros servem para o realce ou a detecção de elementos lineares orientados em direções específicas. Especialmente usados em Geologia e Geomorfologia buscam detectar orientações preferenciais que informem sobre as estruturas do terreno ou os processos de formação das formas de relevo.

A Figura 45 apresenta filtros em oito direções:

$$\begin{array}{cccc}
 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 (a) & (b) & (c) & (d)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\
(e) & (f) & (g) & (h)
\end{array}$$

Figura 45: Filtros Direcionais: (a) norte, (b) nordeste, (c) leste, (d) sudeste, (e) sul, (f) sudoeste, (g) oeste e (h) noroeste.

2.4.4.2.2 Filtros no Domínio de Fourier

A idéia básica deste tipo de filtro é aplicar-se a transformada de Fourier direta, dada pela Eq. (2.82), para que se obtenha o sinal analítico representado no domínio das freqüências, ou melhor, aplicamos a transformada de Fourier direta para obter o espectro de freqüências $F(w)$, do sinal analítico.

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda) e^{i\lambda w} d\lambda \quad (2.82)$$

Na equação, λ representa o domínio original do sinal analítico e $f(\lambda)$, o sinal analítico. Para espectros, λ representa os comprimentos de onda; para cromatogramas ou fiagramas, λ representa a variável tempo e assim por diante.

Uma vez obtido o espectro de freqüências do sinal analítico, devemos cortar as freqüências altas, visto serem estas freqüências, na grande maioria dos casos, relacionadas ao ruído instrumental.

Finalmente aplicamos a transformada de Fourier inversa, dada pela Eq.(2.83) e recuperamos o sinal analítico inicial, livre de ruído.

$$F(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(w) e^{-i\lambda w} dw \quad (2.83)$$

O Filtro de transformada de Fourier pode ser entendido como a transformada de Fourier inversa (τ^{-1}), da transformada de Fourier direta (τ) de um sinal $f(\lambda)$ convolvido com uma unção de apodização $h(\lambda)$. A transformada de Fourier direta de $f(\lambda)$ convolvido com $h(\lambda)$ é dada pela equação (2.84):

$$F(S) = \mathfrak{F}(f(\lambda)h(\lambda)) \quad (2.84)$$

Uma vez que a transformada de Fourier da convolução de duas funções é o produto das transformadas, podemos escrever a equação (2.85):

$$F(S) = \mathfrak{F}(f(\lambda)) \cdot \mathfrak{F}(h(\lambda)) \quad (2.85)$$

No domínio das frequências, a convolução anterior (Eq. 2.85) se reduz à simples multiplicação das correspondentes transformadas de Fourier, como segue na equação (2.86):

$$F(S) = F(w) \cdot H(w) \quad (2.86)$$

Em que:

$$H(w) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se } w \leq w_{\text{critica}} \text{ (freq. de corte)} \\ 1 \text{ se } w > w_{\text{critica}} \end{array} \right\} \quad (2.87)$$

No caso de um filtro passa baixa. Caso seja necessário outro tipo de filtro, deve-se alterar a função de apodização (H) conforme o desejado.

Aplicando a transformada de Fourier inversa à função $F(S)$ obtemos o sinal $f(\lambda)$ livre de ruído, como mostra a Eq. (2.88).

$$F(\lambda) = \mathfrak{F}^{-1}(F(S)) \quad (2.88)$$

A seqüência de operações utilizada no processo de remoção de ruído, através da transformada de Fourier, pode ser facilmente entendida ao observarmos a figura abaixo:

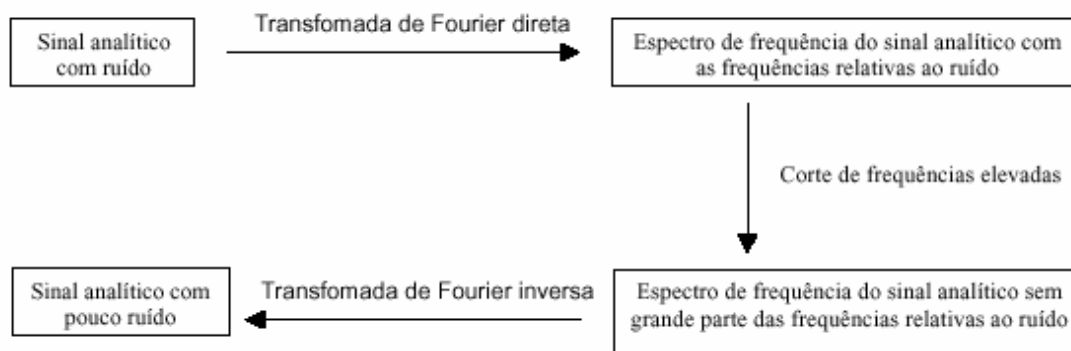


Figura 46: Representação esquemática da seqüência de operações utilizadas na aplicação do filtro de transformada de Fourier. Fonte: CERQUEIRA (1999)

A menos que se possa processar utilizando álgebra simbólica, torna-se inviável computacionalmente a aplicação da transformada de Fourier, pois é impossível processar numericamente integrais com o limite de integração variando de $(-\infty)$ a $(+\infty)$.

Além disso, os dados analíticos são obtidos de forma discreta (são amostrados valores relativos a cada medida) e, desse modo, não se tem uma função $F(\lambda)$, mas sim um vetor de dados discretos (amostrados experimentalmente), o que também impossibilita a utilização da transformada de Fourier. Para resolver esse problema utiliza-se a transformada discreta de Fourier, definida pela Equação (2.87) e pela Equação (2.88), e a transformada discreta inversa, definida pela Equação (2.89).

$$R(w) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi j \lambda}{N}\right) \quad \lambda = 0,1,2,\dots, N-1 \quad (2.89)$$

$$I(w) = \frac{-1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_{\lambda} \text{sen}\left(\frac{2\pi j \lambda}{N}\right) \quad \lambda = 0,1,2,\dots, N-1 \quad (2.90)$$

$$X(\lambda) = \frac{-1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi w \lambda}{N}\right) \cdot I_w \text{sen}\left(\frac{2\pi w \lambda}{N}\right) \quad w = 0,1,2,\dots, N-1 \quad (2.91)$$

No caso, N é o número total de elementos do vetor de dados, $R(w)$ e $I(w)$ se referem à parte real e imaginária da transformada discreta de Fourier (no domínio das frequências) e $X(\lambda)$ se refere ao vetor de dados analíticos (discretos), no domínio do tempo. As operações para a execução do filtro são idênticas às mencionadas com a transformada de Fourier, exceto pela utilização da transformada discreta ao invés da transformada contínua.

Existem algoritmos que executam a transformada discreta de Fourier de modo rápido e fácil, entre eles a FFT (“*Fast Fourier Transform*”) disponível na maioria dos ambientes de computação numérica.

Tais algoritmos admitem que o vetor de dados experimentais refere-se a um período de uma função periódica, pois a transformada de Fourier é definida em todo o espaço amostral (as funções seno e cosseno possuem domínio em todo o espaço real).

Isso pode gerar alguns problemas no caso em que o primeiro elemento do vetor de dados diferir muito do último. O algoritmo FFT irá modelar uma descontinuidade no vetor de dados, ou seja, irá acrescentar elementos de frequência não encontrados nos dados experimentais. Para resolver esse problema pode-se simplesmente tomar o vetor de dados como a combinação dos dados amostrados com a reflexão especular dos mesmos, como ilustrado na Figura 47.

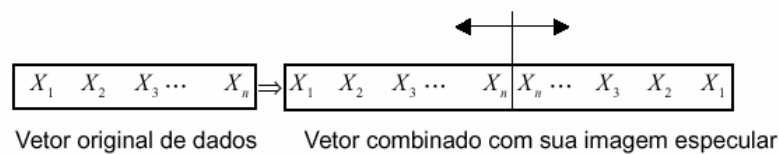


Figura 47: Esquema de composição do vetor de dados para eliminar a descontinuidade entre o primeiro e o último elemento. Fonte: CERQUEIRA (1999)

Com isso, o vetor de dados fica com o dobro de seu tamanho original, mas garante-se que o primeiro ponto seja igual ao último e, desse modo, não se tem nenhuma descontinuidade a ser modelada. Após a filtragem, remove-se a metade posterior do vetor de dados e retorna-se ao tamanho original. Tal procedimento além de evitar o problema da descontinuidade, também garante que, a menos de aproximações numéricas, toda a informação relativa ao espectro de frequências fique na parte real da transformada. O vetor de dados, da forma como é tomado, se refere a uma função par e, como tal, é modelada apenas por uma série de funções cosseno.

O problema da presença de descontinuidades é crítico para a utilização do filtro digital por transformada de Fourier, desse modo, se houver “outliers” (pontos espúrios causados por picos de interferências e / ou erros grosseiros) no vetor de dados, os mesmos devem ser eliminados antes da utilização do filtro. Os “outliers” se caracterizam por serem pontos cujos valores diferem significativamente (até mesmo ordens de grandeza) do valor esperado para os

mesmos. Para remover tais pontos, geralmente substitui-se o mesmo pela média entre seus dois vizinhos mais próximos.

(Autor: EDUARDO O CERQUEIRA, RONEI J. POPPI, LAURO T. KUBOTA, Universidade de Franca, SP, 1999).

2.5 Fusão de Imagens

Para melhor aproveitamento das informações produzidas por diferentes sensores, alguns métodos de processamento de imagens têm sido propostos. Estes métodos combinam imagens de diferentes características espectrais e espaciais para sintetizar uma nova imagem com melhor resolução espacial do que a imagem multiespectral original. A estas operações dá-se o nome de fusão de imagens.

As técnicas de fusão podem ser divididas em três grupos: as que utilizam um modelo de domínio espacial, as de domínio espectral e as que trabalham com operações algébricas.

Os modelos de **domínio espacial** são aqueles que isolam a informação espacial de alta frequência provenientes da imagem de alta resolução e a combinam com a imagem multiespectral (Schowengerdt, 1997). As fusões que utilizam transformadas *Wavelets* e a técnica HPF (*High-Pass Filter*) integram esta categoria.

O grupo de modelos de **domínio espectral** é formado pelos processos que realizam uma transformação na imagem multiespectral, resultando num novo conjunto de bandas onde uma delas é correlacionada com a imagem pancromática. Principais Componentes, IHS, *Gram-Schmidt* são representantes destes modelos.

Outra linha é formada pelos **modelos algébricos** que operam funções aritméticas pixel-a-pixel. Como exemplos podem ser citadas as técnicas *Brovvey* e Multiplicativa (PINHO et al, 2005).

2.5.1 IHS

O primeiro passo nesta técnica consiste na transformação da imagem multiespectral do sistema de cores RGB para o IHS, onde neste último, as cores são representadas através de três componentes: intensidade (*Intensity* - I), matiz (*Hue* - H) e saturação (*Saturation* -S) (seção 2.4).

Após a conversão de sistemas, a componente Intensidade (I) é substituída pela imagem pancromática e, em seguida é realizada a transformação IHS-RGB.

Conforme Pinho et al (2005), apesar de ser uma técnica bastante utilizada, esta fusão possui duas importantes limitações: o número de bandas a ser utilizado limita-se apenas a três e a imagem de saída limita-se a uma resolução radiométrica de 8 bits. Este último problema é derivado da própria natureza dos sistemas de cores que são representados, tradicionalmente, em 8 bits.

2.5.2 Principais Componentes

Em princípio, as análises por Principais Componentes foram empregadas como um meio de reduzir o volume de dados e, ao mesmo tempo, melhorar o contraste das imagens. Pode-se concentrar a maior parte das informações de um conjunto de imagens, em apenas uma imagem sintética: a primeira componente, a qual também tem alto poder de contraste das feições. O método da fusão de imagens por componente principal baseia-se na substituição da primeira componente pela imagem de resolução maior, a qual pode ser contrastada de forma a ter média e variância próximas às da primeira componente.

Conforme Napoleão et al (2001), o Método das Principais Componentes pode ser resumido nas seguintes etapas:

a) Inicialmente é efetuada uma transformação do espaço RGB para o das Principais Componentes. São introduzidas três ou mais bandas da imagem multiespectral, que são transformadas em três ou mais novas imagens do espaço das componentes principais, cada componente possuindo quantidades distintas de informações.

b) Em seguida são calculadas as estatísticas variância e média, e com base no histograma, é aplicado o contraste na imagem de resolução espacial maior, de forma a ter o mesmo colorido que a imagem da primeira componente (PC1), entretanto com uma resolução espacial maior.

c) A primeira componente é substituída pela imagem que foi contrastada, de resolução mais alta. Isso pode ser feito porque assume-se que ambas as imagens tem agora características espectrais semelhantes.

d) Com a “nova” componente colocada em conjunto com as demais componentes (CP2, CP3 etc.) procede-se com a inversão do espaço das principais componentes para o espaço RGB. Pela aplicação de uma transformação inversa volta-se às coordenadas do espaço RGB, no qual todas as bandas híbridas possuem a resolução espacial da banda de maior resolução.

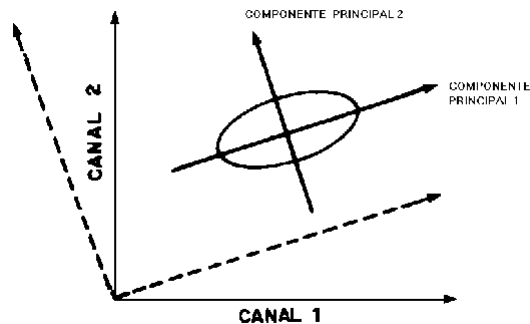


Figura 48: Rotação dos eixos na transformação RGB - Componentes Principais.

A Figura 48 mostra que a transformação de componente principal em duas dimensões corresponde à rotação do eixo original da coordenada para coincidir com as direções de máxima e mínima variância no dado. Neste processo utiliza-se o coeficiente de correlação, ou da covariância, para se determinar um conjunto de quantidades chamadas de autovalores.

Os **autovalores** representam o comprimento dos eixos das componentes principais de uma imagem e são medidos em unidade de variância. Associados à cada autovalor, existe um vetor de módulo unitário chamado autovetor. Os **autovetores** representam as direções dos eixos das componentes principais. São fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original para uma componente principal, numa combinação aditiva e linear (SPRING, 1996).

2.5.3 Gram-Schmidt

Este procedimento, assim como o de Principais Componentes, é uma operação sobre vetores com o objetivo de torná-lo ortogonais. A fusão inicia-se com a simulação de uma banda pancromática a partir das bandas multiespectrais de baixa resolução espacial. Em seqüência, uma transformação de *Gram-Schmidt* é aplicada à banda pancromática simulada e às bandas multiespectrais, onde a pancromática simulada é empregada como a primeira banda. Então, a primeira banda *Gram-Schmidt* é trocada pela banda pancromática de alta resolução e uma transformação inversa é aplicada para formar a imagem sintética de saída (RSI, 2003).

2.5.4 Cor Normalizada

A transformação por cor normalizada está entre os métodos que manipulam as altas frequências através de funções que envolvem soma e multiplicações entre as imagens de diferentes resoluções espaciais (Napoleão et al, 2001). A transformação consiste na multiplicação de cada uma das três bandas da imagem multiespectral pela imagem pancromática de resolução espacial mais alta, e os valores resultantes são normalizados de acordo com a Equação (2.92):

$$CN_i = \frac{(MSI_i + 1) \cdot (PAN + 1) \cdot 3}{\sum_i MSI_i + 3} - 1 \quad (2.92)$$

Onde

CN_i : saída da cor normalizada;

MSI_i : banda multiespectral;

PAN : banda pancromática;

A fórmula anterior possibilita que os valores dos pixels das imagens híbridas resultantes sejam escalonados dentro de um intervalo que vai de 0 a 255, e que também é o formato das imagens originais envolvidas na fusão (VRABEL, 1996).

CAPÍTULO III - METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os softwares utilizados, bem como toda a metodologia de implementação de algoritmos, textos dinâmicos e formulários que compõe a *Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto (PDASR)*.

3.1 Materiais

3.1.1 Programas Computacionais Utilizados

Durante a execução do trabalho foram utilizados os seguintes *softwares*:

PHP Editor 2.22 – Beta 2

A função deste *software* foi servir como “editor” para desenvolvimento do código PHP e HTML das páginas *Web*, oferecendo facilidades que auxiliam o usuário na inserção de comandos, construção e revisão de algoritmos.

O **PHP Editor** é um pacote que contém o *Editor*, o *PHP*, um *mini-servidor web* e o *manual do PHP*. O uso integrado deste pacote permite ao programador testar suas rotinas em PHP sem que exista um servidor web instalado em seu micro-computador. Foi desenvolvido por Diogo Edegar Mafra, caracterizando-se por ser um software totalmente livre, podendo ser obtido através do endereço eletrônico <<http://www.phpeditor.kit.net>>.

Apache 1.3.33

Este software trata-se de um servidor web, instalado no micro-computador do desenvolvedor do PHP afim de possibilitar o uso de *páginas dinâmicas*. Neste trabalho foi utilizada a versão **1.3.33**.

O servidor web Apache é uma implementação de um servidor *HTTP* (*Hiper Text Transfer Protocol*), mantido pela Apache Software Foundation. Um servidor HTTP funciona recebendo, processando e enviando requisições através do protocolo HTTP. Geralmente, os usuários clientes acessam este tipo de serviço usando clientes-HTTP (*navegadores*) como *FireFox*, *Internet Explorer* ou *Netscape* (entre outros...), para obter conteúdos como textos, imagens, filmes ou *páginas dinâmicas*.

Sendo também um software livre, o pacote de instalação pode ser obtido através do link <<http://www.apache.org/dist/httpd/binaries/win32/>>.

PHP - 4.3.11

O *PHP* (*Hyper Text Pre-processor*) foi a linguagem de programação escolhida para execução dos algoritmos de PDI com menor complexidade (nº de operações) e para funcionamento dos formulários dinâmicos das páginas web. Para ser utilizado na máquina do desenvolvedor, o PHP precisa ser instalado, pois é uma linguagem que roda no servidor web. Foi utilizada a versão **4.3.11** por ser a mais recente na época do começo do desenvolvimento do trabalho.

O pacote de instalação (manual ou automático) pode ser obtido gratuitamente em <<http://www.php.net/download.php>>.

GDAL - 1.4.0

A *GDAL* (*Geospatial Data Abstraction Library*) trata-se de uma biblioteca de tradução para dados no formato *raster*, tendo como características principais a licença “*open source*” (código aberto), suporte a diversos formatos de imagens e possibilidade de utilização de seus aplicativos através de linhas de comando. É mantida por Frank Warmerdam e seus arquivos fonte estão disponíveis em <<http://www.gdal.org>> para *download* gratuito, encontrando-se atualmente na versão **1.4.0**.

Dev-C++ 4.9.9.2

Este pacote foi utilizado no desenvolvimento de todas as rotinas na linguagem C. Possui uma interface amigável com o usuário muitos recursos disponíveis, tais como gerenciador de projetos, depuração integrada, editor de sintaxe personalizável, entre outros.

O Dev-C++ é um ambiente de desenvolvimento integrado para programação nas linguagens C++/C, onde é possível escrever, compilar, debugar e executar programas escritos em C++/C. Trata-se de um software gratuito e de código aberto, sendo totalmente escrito em *Delphi*, podendo ser obtido em <<http://www.bloodshed.net>>.

ENVI 3.2

Este software serviu como base de testes e comparação durante toda a fase de implementação dos algoritmos de processamento digital de imagens.

ENVI, o ambiente para visualização de imagens é um software completo para processamento de imagens em Sensoriamento Remoto que não apresenta muita complexidade de utilização, proporcionando alto desempenho e sofisticação sem exigir equipamento caro para isto.

O ENVI permite realizar:

- Análise avançada de imagens hiperespectrais;
- Correções radiométricas e geométricas de sensores específicos;
- Suporte para vários formatos de imagens e vetores;
- Classificação e melhoramento da imagem interativa;
- Muitas ferramentas para Região de Interesse (ROI), visualização de vetores, digitalização, edição e consultas;

MultiSpec 2.8

O MultiSpec caracteriza-se por ser um software de tratamento de imagens com licença gratuita. Ele também foi utilizado largamente nas etapas de construção dos algoritmos de PDI, comparando-se seus resultados com os obtidos nas rotinas da *PDASR*.

Foi utilizada a versão 2.8 do MultiSpec, o qual pode ser obtido através do endereço <<http://cobweb.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>>.

SPRING 3.6

O **SPRING** (Sistema de Processamento de Informações Geográficas) é um SIG no estado-da-arte com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais.

O **SPRING** é um projeto do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) / DPI (Divisão de Processamento de Imagens) com a participação de:

- EMBRAPA/CNPq - Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para Agricultura.
- IBM Brasil - Centro Latino-Americano de Soluções para Ensino Superior e Pesquisa.
- TECGRAF - PUC Rio - Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio.
- PETROBRÁS/CENPES - Centro de Pesquisas "Leopoldo Miguez".

O **SPRING** tem como objetivos principais (SPRING, 1996):

- Construir um sistema de informações geográficas para aplicações em Agricultura, Floresta, Gestão Ambiental, Geografia, Geologia, Planejamento Urbano e Regional.
- Tornar amplamente acessível para a comunidade brasileira um SIG de rápido aprendizado.
- Fornecer um ambiente unificado de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto para aplicações urbanas e ambientais.
- Ser um mecanismo de difusão do conhecimento desenvolvido pelo INPE e seus parceiros, sob forma de novos algoritmos e metodologias.

Foi utilizado nos testes de alguns algoritmos implementados na PDASR. A versão 4.3.3 pode ser obtida livremente no endereço eletrônico <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php>>.

3.1.2 Linguagens de Programação

Os motivos para a escolha do PHP como linguagem de programação são inúmeros, e podem ser explicados pelas próprias características da linguagem, tais como: eficiente suporte matemático, sistema multiplataforma, suporte a um grande número de banco de dados além de possuir seu código-fonte aberto.

A utilização do PHP como ferramenta de suporte ao Geoprocessamento vem sendo testada no Curso de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através da criação da página *web* “Cálculos Geodésicos - Aplicações on-line”, apresentando excelentes resultados até o momento. Mais detalhes em <<http://www6.ufrgs.br/engcart/Teste/inicial.html>> (Brys, 2005). Além disso, o PHP já é uma linguagem utilizada em larga escala pelos usuários de Servidores de Mapas (*Map Servers*), justamente devido à sua relativa facilidade de aprendizagem e poderosos recursos.

Para validação do PHP como ferramenta direta em operações com imagens orbitais foram realizados diversos testes, os quais tentaram avaliar o resultado da linguagem nas operações aritméticas, matriciais e na leitura e formação de imagens. Entre as técnicas de PDI implementadas destacam-se a geração e manipulação de histogramas (*Stretch*, *Equalização* e *Macthing*), transformação de uma imagem do espaço de cores *RGB* para o espaço *HSV* e a Fusão de Imagens utilizando o método de substituição por Transformação *IHS*. Os algoritmos citados acima tiveram resultados muito satisfatórios quando comparados com os softwares comerciais *ENVI 3.2*, *MultiSpec 2.8* e *Spring 3.6*.

Contudo, a grande quantidade de operações necessárias para executar-se cada um destes procedimentos fez com que o PHP apresentasse algumas limitações ao projeto, derivadas das características de linguagem de alto nível, onde ele se enquadra, tais como:

- Tamanho máximo do arquivo de imagem em torno de 200 kbytes;
- Velocidade de processamento;
- Possibilidade de utilização de imagens somente nos formatos GIF, JPEG, PNG e BMP.

Devido a estas limitações do PHP, procurou-se uma linguagem de programação que pudesse ser utilizada na execução das rotinas mais complexas. Após pesquisa em algumas linguagens de programação que preenchessem os requisitos necessários, elencou-se a *Linguagem C*.

Algumas características da linguagem *C* foram determinantes para a sua escolha, tais como:

- Possuir acesso de baixo-nível à memória do computador, através do uso de ponteiros;
- Linguagem nuclear extremamente simples, com funcionalidades não-essenciais, tais como funções matemáticas ou manuseamento de ficheiros (arquivos), fornecida por um conjunto de bibliotecas de rotinas padronizada;

A limitação quanto ao tamanho do arquivo, que na verdade resumia-se ao número de operações para interpretar um grande número de pixels foi resolvido, utilizando-se o recurso de “ponteiros” do *C*, o qual permite um acesso muito rápido para leitura e escrita. Em testes durante a fase de implementação, fez-se testes com imagens de até 30 Mbytes, apesar de não estar disponibilizado acesso a arquivos desta magnitude na página *web*.

Um *ponteiro* é uma variável que contém um endereço de memória. Esse endereço é normalmente a posição de uma outra variável na memória (SCHILDT, 1996).

Por ser uma linguagem de médio nível, o algoritmo em *C* torna-se mais complexo do que o mesmo algoritmo feito no *PHP* (alto nível), por exemplo. Em compensação, o programador possui um número de recursos muito maior e pode controlar com mais segurança as operações que necessita processar.

Apenas a título de ilustração, o *PHP* possui um comando que faz a leitura do CD de um pixel de uma imagem, bastando para isso que a imagem tenha sido aberta pelo programa. Na linguagem *C* não existem comandos deste tipo, sendo necessário que o programa “leia” a imagem byte a byte.

Faz-se necessário então que o programa “conheça” o tipo de formato de imagem que está sendo utilizado, a fim de identificar as partes que formam o arquivo (p.e. Cabeçalho, Área de dados, Etiquetas, etc...). Detalhes de alguns formatos na seção 2.2.

Em resumo, nas páginas da *PDASR* o usuário estará interagindo, além dos formulários em *HTML*, com algoritmos nas linguagens *PHP* e *C*.

3.1.2.1 Linguagem PHP

A primeira versão do PHP surgiu em 1995, quando *Rasmus Lerdorf* criou para uso pessoal uma ferramenta chamada PHP/FI (*Personal Home Page/Forms Interpreter*). Porém, ele não imaginava que estava criando uma das mais poderosas linguagens para o

desenvolvimento de aplicações na Web (Rede Mundial de Computadores, ou *Internet*). O PHP é uma linguagem totalmente voltada à Internet, possibilitando o desenvolvimento de websites realmente dinâmicos. Sites dinâmicos são aqueles que retornam para o cliente uma página criada em tempo real.

O PHP (sigla que hoje é um acrônimo recursivo para PHP: *Hipertext PreProcessor*) é uma linguagem de programação *server-side scripts* (scripts executados no servidor). Um exemplo de *server-side scripts* são os sistemas de busca da internet (www.google.com.br, www.yahoo.com.br, etc...).

Quando o usuário acessa uma página PHP por meio de seu *browser* (navegador), todo o código PHP é executado no servidor, e os resultados são enviados para seu navegador. Portanto, o navegador exibe a página já processada, sem consumir recursos de seu computador. As linhas de programação PHP não podem ser vistas por ninguém, já que elas são executadas no próprio servidor, e o que retorna ao usuário é apenas o resultado do código executado.

As linhas de código PHP são embutidas no código HTML (*HiperText Markup Language*). O HTML é a linguagem padrão para criação de páginas de Internet. Como o próprio significado da sigla informa, o HTML é capaz de proporcionar hiper-textos. Hiper-texto é um modo que proporciona ao usuário uma maior interação com textos de uma página web, onde informações são interligadas intuitiva e associativamente. Através de saltos - que marcam o movimento do hipertexto - o leitor assume um papel ativo, sendo ao mesmo tempo co-autor.

Por não tratar-se de uma linguagem de “programação” propriamente dita (trata-se de uma linguagem descritiva que tem como objeto dar formato ao texto e às imagens que se pretende visualizar no navegador), o HTML necessita de linguagens que complementem e supram as suas limitações, como é o caso do PHP (BHON, 2004).

A Figura 49 apresenta uma ilustração do funcionamento da linguagem PHP.

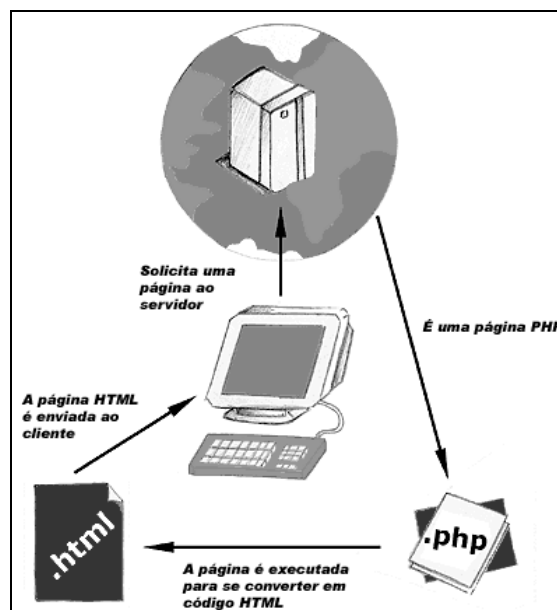


Figura 49: Esquema do funcionamento de uma página web em PHP (Fonte: PHPBRASIL, 2006)

Como já dito, o PHP apresenta eficiente suporte matemático, além de possuir suporte a um grande número de banco de dados, como dBase, Interbase, mSQL, mySQL, Oracle, Sybase, PostgreSQL e vários outros. Construir uma página baseada em banco de dados torna-se uma tarefa extremamente simples. Também oferece suporte a outros serviços através de protocolos como IMAP, SNMP, NNTP, POP3 e, logicamente, HTTP. Ainda é possível abrir *sockets* e interagir com outros protocolos.

Basicamente, qualquer script que pode ser feito por linguagens como C, C++, Perl, entre outras, pode ser feito também com PHP, como por exemplo, coletar dados de formulários, gerar páginas dinâmicas ou enviar e receber cookies (BHON, 2004).

Uma das principais vantagens do PHP é que ele pode ser executado em diversos sistemas operacionais (multiplataforma), como *Linux, Windows, Unix, OS/2, Macintosh, NT*, etc., além de permitir mudanças de plataforma com nenhuma ou pouquíssimas alterações em seus códigos-fonte.

Além disso, o PHP é gratuito, permitindo que seu arquivo de instalação possa ser obtido gratuitamente no site oficial do PHP <<http://www.php.net.br>>. Outra característica importante é que ele é um software com código aberto (*open source*). O código-fonte do PHP, assim como sua documentação detalhada também está disponível no site oficial (NIEDERAUER, 2004).

Para o leitor interessado em saber mais sobre essa linguagem, pede-se que acesse as seguintes páginas na internet referenciadas em PHP (2006), CRIARWEB (2006), e INFOWESTER (2006). Nesses endereços é possível encontrar uma vasta documentação sobre

a linguagem, além de endereços para listas de discussão e a ajuda de programadores mais experientes.

3.1.2.2 Linguagem C

A linguagem C foi concebida e implementada por Dennis Ritchie, nos laboratórios Bell, para ser usada no sistema operacional UNIX em 1972. C é o resultado de um processo de desenvolvimento que começou com uma linguagem mais antiga, chamada BCPL, criada na década de 70.

C é frequentemente chamada de linguagem de médio nível porque combina elementos de linguagens de alto nível com a funcionalidade da linguagem *assembly* (baixo nível). Nessa categoria, o C permite a manipulação de bits, bytes e endereços – os elementos básicos com os quais o computador funciona. Outro aspecto importante do C é que ele possui apenas 32 palavras-chave, que são os comandos que compõe a linguagem. As linguagens de alto nível tipicamente tem várias vezes esse número de palavras reservadas (SCHILDT, 1996).

Linguagem de programação de baixo nível trata-se de uma linguagem de programação mais próxima ao código da máquina e, portanto, menos abstrata, enquanto as linguagens de alto nível possuem um nível de abstração relativamente elevado, longe do código de máquina e mais próximo à linguagem humana.

A linguagem C tem como ponto forte a sua eficiência, e é uma das linguagens de programação preferidas para o desenvolvimento de sistemas e softwares de base, apesar de também ser usada para desenvolver programas de computador. É também muito usada no ensino de ciências da computação, mesmo não tendo sido projetada para estudantes.

Muitas linguagens de programação foram influenciadas por C, sendo que a mais utilizada atualmente é C++, que por sua vez foi uma das inspirações para a Linguagem Java.

Por haver compiladores C para quase todos os computadores, é possível tomar um código escrito para uma máquina, compilá-lo e rodá-lo em outra com pouca ou nenhuma modificação. Essa “portabilidade” é uma das características do C. Um compilador lê o programa inteiro e converte-o em um código-objeto, que é uma tradução do código-fonte do programa em uma forma que o computador possa executar diretamente. Desta maneira, tudo que o programador precisa fazer para executar o programa é, normalmente, digitar apenas o seu nome.

3.1.3 Formatos de Imagem interpretados

Conforme apresentado no Capítulo II, diversos são os formatos que uma imagem pode assumir, tendo cada um deles suas particularidades e níveis de complexidade distintos.

Em vista disso, no desenvolvimento dos algoritmos responsáveis pela leitura da imagem teve que ser escolhido um formato padrão para as imagens utilizadas na *PDASR*. Esse formato foi o *TIFF*, selecionado entre os demais pelo fato de ser “compreendido” por praticamente todos os softwares de geoprocessamento e ser bastante difundido entre a comunidade formada pelos usuários de imagens de sensoriamento remoto. Outra vantagem é que este formato encontra-se bem documentado em Vanconcelos (2002) e *TIFF - Revision 6.0* (1992).

Na intenção de oferecer ao usuário da *PDASR* mais alternativas em termos de formatos de arquivo de imagem foi adicionada ao portfólio de algoritmos uma biblioteca chamada *GDAL*. Suas características estão descritas na seção 3.1.

Utilizou-se o comando “*gdal_translate*” da *GDAL*, o qual tem a propriedade de realizar transformações entre formatos de imagens. De posse desta ferramenta, a *PDASR* passou a aceitar, além do *TIFF*, os formatos *JPG*, *LAN* e *IMG*, os quais são identificados no momento em que o arquivo de imagem do usuário chega ao servidor web (*upload*), sendo então, via comando em *PHP*, transformado para o formato *TIFF* pela *GDAL*.

3.2 Criação da PDASR

A Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto está dividida em 7 módulos principais, os quais podem ser acessados pelo menu suspenso da página de abertura (Figura 50), estando organizados da seguinte maneira:

Módulo 1: princípios do Sensoriamento Remoto, abordando tópicos como o espectro eletromagnético, a formação das cores e resoluções das imagens de SR.

Módulo 2: estrutura das imagens em sensoriamento remoto, apresentando os principais tipos de arquivos de imagem.

Módulo 3: teoria sobre o Processamento Digital de Imagens, com temas sobre a geração de histogramas, correções radiométricas e geométricas.

Módulo 4: realçamento e suavização de imagens, apresentando técnicas de manipulação de histogramas e técnicas envolvendo uma vizinhança.

Módulo 5: fusão de imagens, abordando alguns dos principais métodos.

Módulo 6: oferece ao usuário a possibilidade de aplicação das principais técnicas de PDI de maneira on-line através da web.

Módulo 7: diagrama em blocos dos algoritmos implementados na PDASR.

Módulo 8: referências bibliográficas utilizadas nos textos apresentados, com diversos links para consulta sobre os assuntos abordados.

CEPSRM
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS
EM SENSORIAMENTO REMOTO
E METEOROLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto

Painel Eletrônico

- Acesse o website do Curso de Engenharia Cartográfica da UFRGS e a página de "Cálculos Geodésicos On-line". [Clique aqui](#).

- Como chegar ao Campus Vale da UFRGS? Onde está o Centro de Sensoriamento Remoto. Clique [aqui](#) e confira a localização.

A [Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto \(PDASR\)](#) é parte integrante da Dissertação de Mestrado de Leonardo Monteiro Brys, inserida na Linha de Pesquisa "Métodos de Processamento e Classificação de Imagens" do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia ([CEPSRM](#)) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul ([UFRGS](#)).

A proposta principal da página é a criação de um conjunto de ferramentas para processamento digital de imagens na internet. A ideia é disponibilizar a professores, estudantes e demais interessados em Sensoriamento Remoto, ferramentas para internet onde é possível expor conceitos e definições de forma interativa, ao mesmo tempo em que possibilita a direta aplicação de algumas técnicas de Processamento Digital de Imagens, inclusive com a utilização de imagens do próprio usuário, sem que exista a necessidade de instalação de programas na sua estação de trabalho.

Principais links da PDASR

- Sensores e Plataformas Orbitais
- Operações PDI On-line
- Formatos Suportados
- Softwares de Geoprocessamento Gratuitos
- Linguagens de Programação Utilizadas

Figura 50: Página principal da PDASR.

3.2.1 Implementação dos Textos no Ambiente Web

O conteúdo dos elementos de texto da PDASR teve como base a revisão bibliográfica do Capítulo II, apresentando de forma dinâmica os assuntos abordados.

Os termos e expressões mais importantes são destacados do restante do texto, estando estes associados à links que direcionam o usuário a uma nova janela do navegador com mais informações sobre aquele assunto.

Na Figura 51 apresenta-se um exemplo dos textos implementados no Módulo 1 (Processo de Formação de Cores).

1. Formação das Cores

Formação das Cores

2. Espaço de Cores RGB

3. Espaço dos Atributos de Cores: Matiz, Saturação e Intensidade

3.1. Modelo de Cores HSV

3.2. Modelo de Cores HSV de

Harrington (1987)

3.3. Modelo de Cores HLS

3.4. Modelo de Cores IHS

3.5. Modelo de IHS de Pratt (1991)

4. Problemas Inerentes aos Atributos de Cores

Existem diversas teorias sobre a visão das cores. A teoria mais aceita preconiza que existem três tipos de cones (receptores): sensíveis à luz vermelha, sensíveis à luz verde e sensíveis à luz azul. A luz branca ao incidir sobre a retina do olho humano, estimularia igualmente todos os receptores. A luz vermelha ao incidir sobre a retina apenas estimularia os receptores sensíveis àquela radiação provocando a percepção visual da cor vermelha. Quando a cor amarela é vista, a sensação resulta do fato de que tanto os receptores sensíveis ao verde quanto ao vermelho estão sendo estimulados com a mesma intensidade.

O primeiro cientista a provar que a sensação de luz branca era o resultado da existência simultânea de "luzes" de vários matizes foi Isaac Newton, através de um experimento simples, que consistiu em fazer incidir um feixe de luz branca sobre um prisma. A luz emergente do prisma projetada num anteparo branco resultou numa sucessão de diferentes matizes semelhantes às observadas em um arco-íris. O fato de o prisma promover a decomposição da luz branca comprova a natureza ondulatória da radiação, visto que esta se deve a variação do índice de refração do prisma nos diferentes comprimentos de onda. Cada matiz decomposto está dessa forma associado a uma determinada frequência de radiação ou comprimento de onda.

O que as cores que conhecemos de fato, denominadas de luz visível, representam é uma parcela diminuta do espectro eletromagnético, se estendendo de 400 nm a 700 nm aproximadamente, tal como visto na Figura 4. Aceita-se internacionalmente desde 1931 os valores 435,8 nm, 546,1 nm e 700 nm como os que representam espectralmente as três cores primárias aditivas, azul, verde e vermelho respectivamente, de acordo com a CIE ("Commission Internationale de l'Éclairage") (SOUTO, 2000).

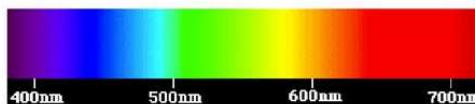


Figura 51: Página da PDASR com textos sobre a Formação das Cores.

3.2.2 Implementação dos Algoritmos

Os algoritmos implementados na *PDASR* foram separados em seis categorias, sendo:

- Análise e Manipulação de Histogramas
- Aplicação das Técnicas de Manipulação do Histograma em Imagens de SR
- Transformação entre Sistemas de Cores
- Fusão de Imagens
- Correções Geométricas
- Filtragem Digital

3.2.2.1 Análise e Manipulação de Histogramas

Conforme descrito na seção 2.4, o histograma é uma das formas mais comuns de se representar a distribuição dos **Contadores Digitais (CD's)**, ou níveis de cinza de uma imagem, fornecendo a informação sobre quantos pixels na imagem possuem cada valor possível de nível de cinza.

As técnicas de manipulação do histograma visam aumentar o contraste entre os elementos da imagem, realçando características específicas relacionadas aos alvos imageados. A seguir serão apresentadas as opções fornecidas ao usuário da *PDASR* para análise e manipulação do histograma de uma imagem, sendo apresentado um diagrama em blocos dos algoritmos implementados nas respectivas funções.

3.2.2.1.1 Visualização do Histograma

A fim de representar o histograma de uma imagem, deve-se inicialmente “ler” os valores de contador digital de cada pixel, armazenando-os em variáveis (um vetor), de modo que estas possam ser incrementadas toda vez que houver repetição de um contador digital (nível de cinza).

Seja,

CD: valor do contador digital do pixel, variando de 0 à (2^x-1) onde x é igual ao número de bits da imagem (resol. radiométrica);

$X []$: vetor que armazena a quantidade de pixels de cada **CD**;

i : índice que conta o número de pixels da imagem;

Um algoritmo para apresentação do histograma de uma imagem pode ser representado pelo diagrama abaixo (Figura 52).

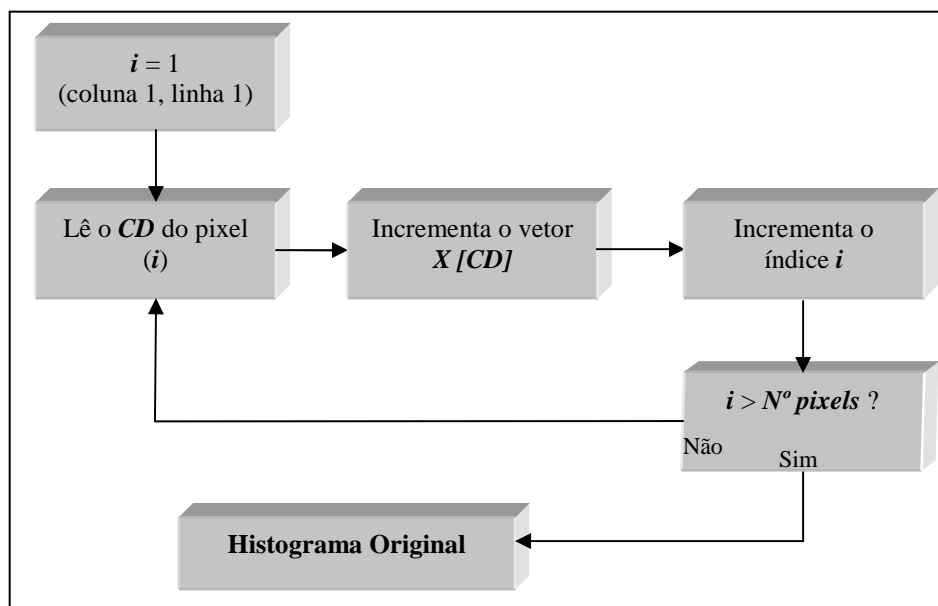


Figura 52: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma.

Na *PDASR*, após selecionar o arquivo de imagem e os canais desta que deseja visualizar o histograma, o usuário escolhe a opção “*Original*” na guia “*Selecione o tipo de histograma*”, pressionando botão “*Executar*” para obter o(s) resultado(s) em uma nova janela do navegador, conforme visualizado na Figura 53.

The screenshot shows a web application window titled "Operações com o Histograma da Imagem". It contains three main sections for user input:

- Selecione a imagem:** A text input field containing the file path "C:/Imagem_teste.tif" and a "Procurar..." button.
- Selecione o canal:** A dropdown menu currently displaying "Canal 1".
- Selecione o tipo de histograma:** A dropdown menu with "Original" selected. Other visible options include "Nenhum", "Acumulado", "Equalizado", "Stretch Linear", "Stretch Raiz Quadrada", "Stretch Quadrado", "Stretch Logaritmo", and "Stretch Negativo".

An "Executar" button is located at the bottom center of the form.

Figura 53: Página web para visualização do histograma.

3.2.2.1.2 Visualização do Histograma Acumulado

O histograma acumulado não possui aplicações diretas, mas é de grande importância para o cálculo de outras técnicas de manipulação do histograma, como a *equalização* e o *matching*.

Um algoritmo para apresentação do histograma de uma imagem pode ser representado pelo diagrama abaixo (Figura 54).

Inicialmente é feita a leitura dos contadores digitais de todos os pixels da imagem, armazenando a quantidade de cada *CD* no vetor $X[CD]$ (processo idêntico à geração do histograma original). A seguir é armazenado em um novo vetor $Y[j]$ (onde $j = 0,1,\dots, N^\circ \text{ de níveis de cinza}$), de forma acumulativa, as quantidades de pixel em cada elemento de $X[CD]$, resultado este que representará o histograma de saída.

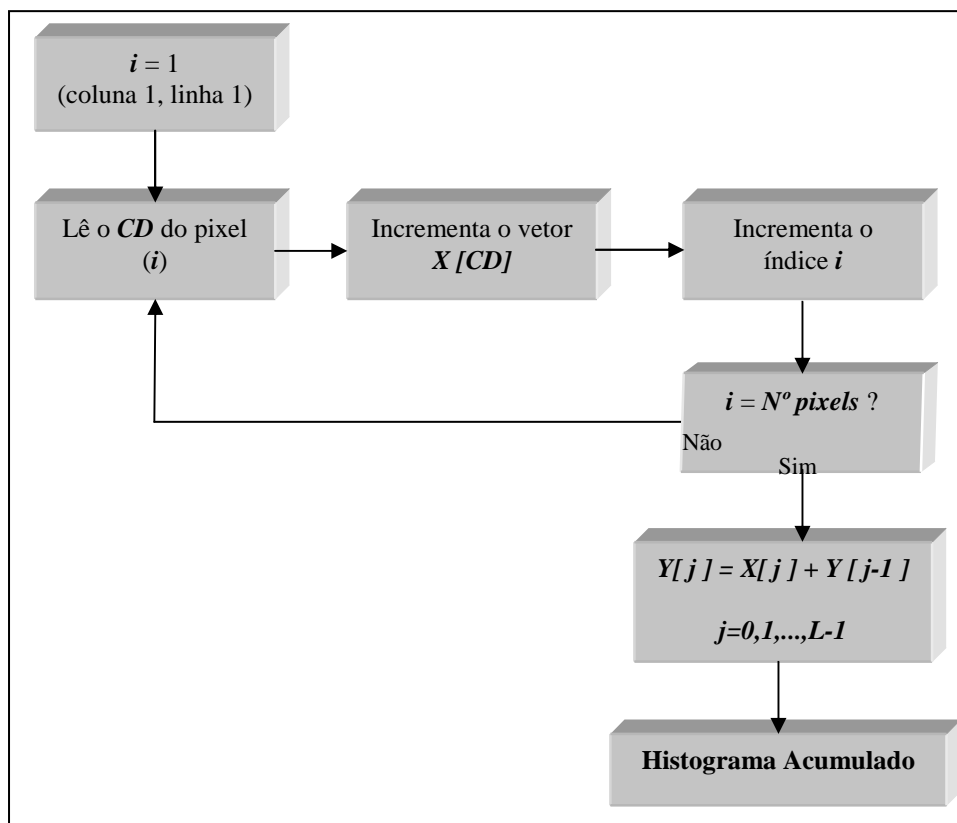


Figura 54: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma acumulado.

Devido à importância do uso do histograma acumulado, foi adicionada uma opção na página web que permite sua visualização, selecionando-se a opção “Acumulado” (Figura 53).

3.2.2.1.3 Visualização do Histograma Equalizado

Conforme descrito na seção 2.7.4, a *Equalização* do histograma visa aumentar o contraste entre as feições da imagem.

O processo começa com a geração do histograma acumulado da imagem original (idem à Figura 54), seguido do cálculo de um fator de escala (**Fator**), o qual será responsável pelo “espalhamento” dos pixels no intervalo dos possíveis valores de Nível de Cinza (**NC**), onde:

L: número total de contadores digitais disponíveis

N: número total de pixels na imagem

A seguir é acionada nova função de repetição, variando de **0** até **L-1**, onde, a partir do arredondamento (*round*) dos valores do histograma acumulado ($Y[j]$) de cada *NC* multiplicado pelo fator de escala (*Fator*) é calculada uma nova posição para os pixels deste *NC*, no histograma de saída (vetor $Pos[j]$).

Esta posição ($Pos[j]$) recebe então a quantidade de pixels existente no *NC* do histograma original ($X[j]$), formando um novo vetor ($Eq[j]$) já com os valores finais do histograma equalizado.

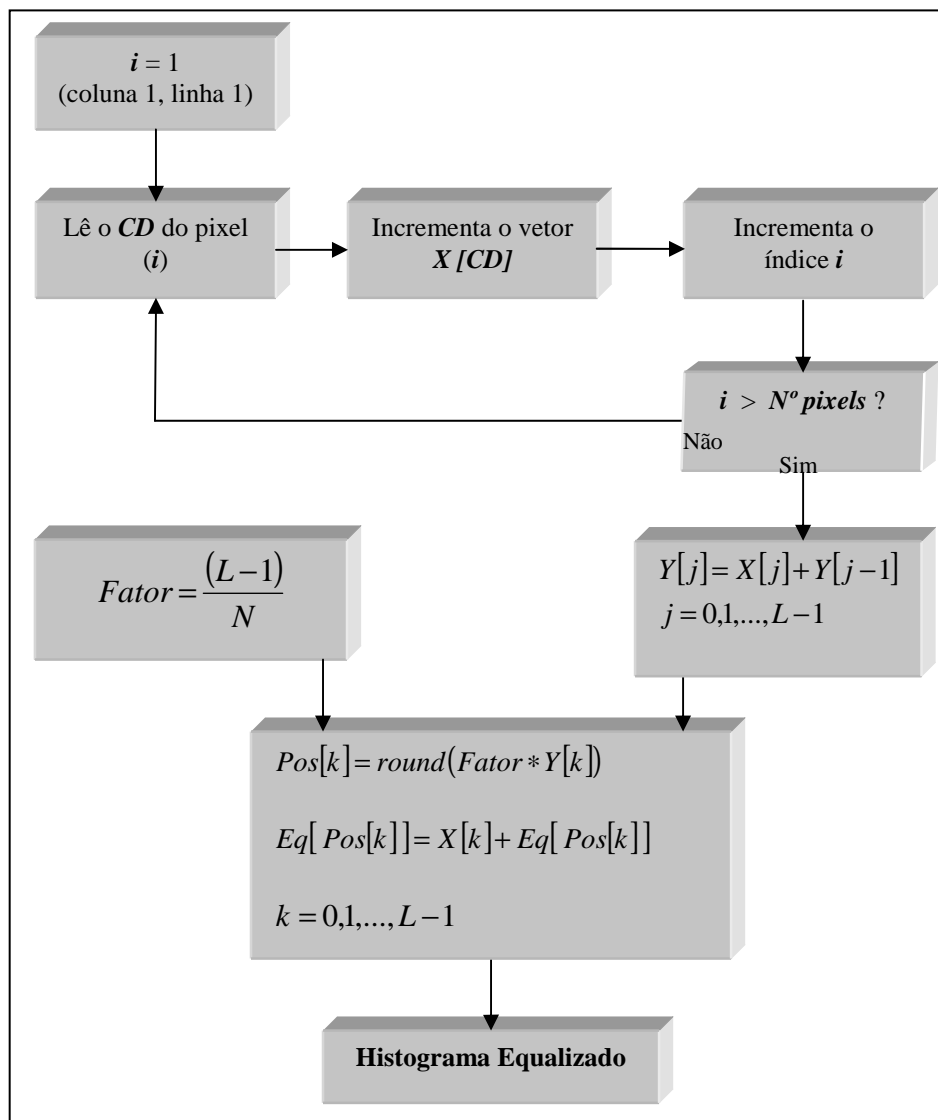


Figura 55: Diagrama representando o algoritmo para geração do histograma equalizado.

Da mesma forma que os histogramas original e acumulado, o usuário da *PDASR* pode obter o histograma equalizado de uma imagem selecionando a opção “*Equalizado*” na guia “*Selecione o tipo de histograma*” (Figura 53).

3.2.2.1.4 Visualização do Stretch do Histograma

O *Stretch* do histograma faz com que haja um espalhamento do histograma, procurando preencher todos os possíveis níveis de cinza deste intervalo. Esta operação é obtida através de uma transformação linear, tendo seu resultado final alterado de acordo com a função utilizada.

Na *PDASR* foram implementados os tipos de *Stretch* mais utilizados e encontrados com maior facilidade nos softwares comerciais de Geoprocessamento. A seguir serão apresentados os cinco tipos encontrados na página web.

Stretch Linear

Neste tipo de *Stretch* o usuário pode fazer a opção sobre o intervalo de níveis de cinza onde haverá o “espalhamento” do histograma, separadamente para cada canal da imagem (no caso de imagens multi-espectrais), inserindo valores de ***CD Min*** e ***CD Max*** (Contador Digital Mínimo e Máximo respectivamente), conforme Figura 56. Por *default* a página web tem os valores setados para o intervalo de 0 à 255 (256 níveis de cinza - imagem de 8 bits de resolução radiométrica) para os três canais.

A partir da seleção da imagem e dos canais a serem visualizados, o usuário faz a opção por “*Stretch Linear*” na caixa de seleção, inserindo também os valores relativos ao intervalo de níveis de cinza, pressionando o botão “*Executar*”.

Operações com o Histograma da Imagem

Selecione a imagem

Selecione o canal

Selecione o tipo de histograma

Nenhum
Original
Acumulado
Equalizado
Stretch Linear
Stretch Raiz Quadrada
Stretch Quadrado
Stretch Logaritmo
Stretch Negativo

Valores limites de Contadores Digitais (Stretch)

Canal 1:	CD Min:	<input style="width: 30px;" type="text" value="0"/>	CD Max:	<input style="width: 30px;" type="text" value="255"/>
Canal 2:	CD Min:	<input style="width: 30px;" type="text" value="0"/>	CD Max:	<input style="width: 30px;" type="text" value="255"/>
Canal 3:	CD Min:	<input style="width: 30px;" type="text" value="0"/>	CD Max:	<input style="width: 30px;" type="text" value="255"/>

Figura 56: Página web para visualização do *Stretch* do histograma.

Ao dar início à operação de *Stretch Linear*, é executado o algoritmo da Figura 57, o qual está representado por meio de um diagrama em blocos.

A primeira etapa é o cálculo dos coeficientes **A** e **B** (Equação 2.75) a partir dos valores de *CD_Max* e *CD_Min* escolhidos pelo usuário, onde *L* corresponde ao número total de contadores digitais disponíveis.

Inicia-se então a leitura dos valores de *CD* de cada pixel da imagem ($i = 1, 2, \dots, N$; onde *N* é o número total de pixels), realizando a transformação linear da Eq. 2.75 afim de obter-se um novo valor de *CD* para este pixel. Este valor é adicionado ao vetor $X[CD]$, o qual representa o histograma de saída.

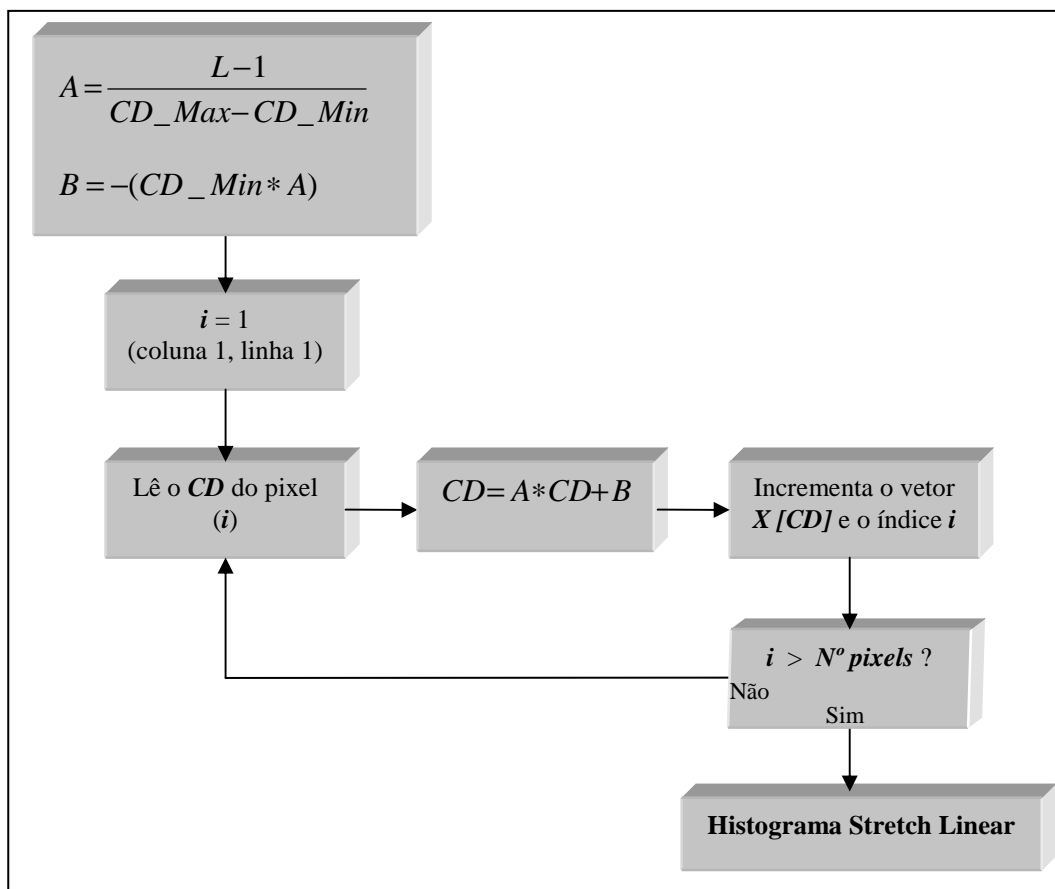


Figura 57: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Linear do histograma.

Stretch Raiz Quadrada

Para obter este tipo de *Stretch* do histograma de uma imagem, o usuário deve selecionar na *PDASR* a opção "*Stretch Raiz Quadrada*" (Figura 56), após a seleção da imagem e do canal a visualizar. Clicando no botão "*Executar*" é ativada a rotina apresentada na Figura 58.

Inicialmente é calculado um fator de ajuste A , o qual visa adequar os valores de saída dentro do intervalo de níveis de cinza da imagem.

Após, a imagem é lida pixel à pixel, sendo aplicado a cada valor de CD a transformação linear dada pela Eq. 2.76, obtendo um novo valor de CD , o qual é armazenado no vetor $X[CD]$ para formar o histograma de saída.

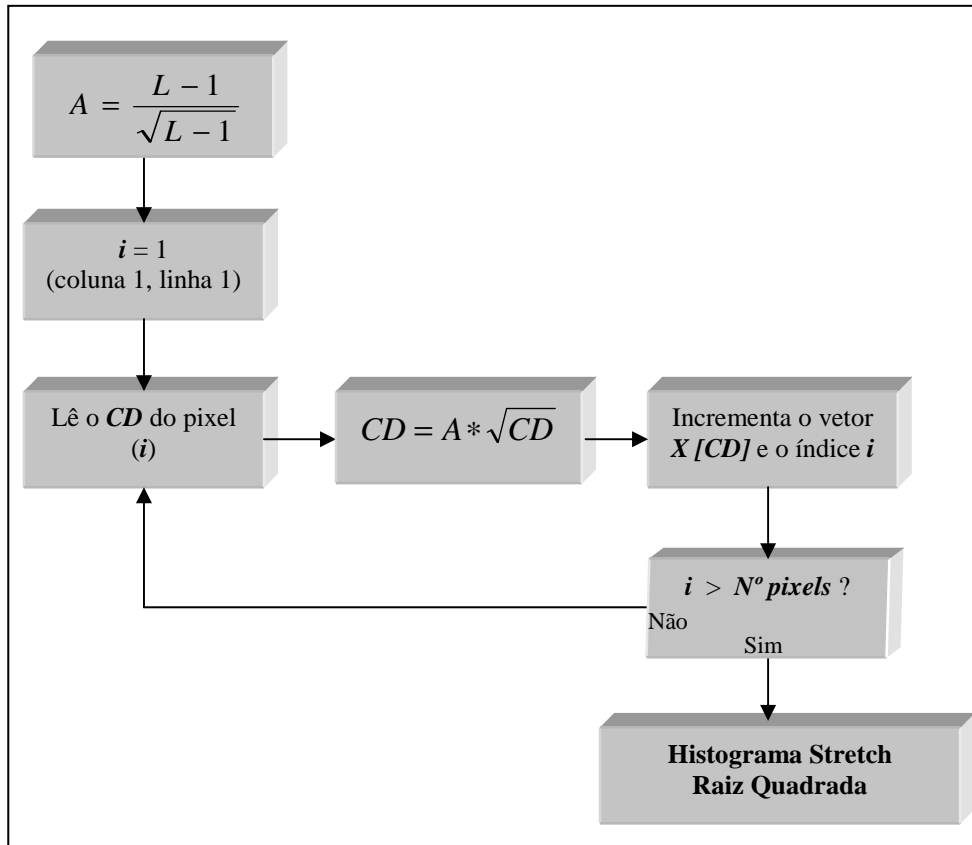


Figura 58: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Raiz Quadrada do histograma.

Stretch Quadrado

A implementação do *Stretch Quadrado* é feita de forma semelhante ao Stretch Raiz Quadrada, com relação às operações realizadas, excetuando-se o cálculo do fator de ajuste A (diagrama da Figura 59) e da função linear apresentada na Eq. 2.77 (Cap. II).

O usuário acessa esta operação sobre o histograma de sua imagem selecionando a opção “*Stretch Quadrado*” no menu “*Selecione o tipo de histograma*” da PADS (Figura 53).

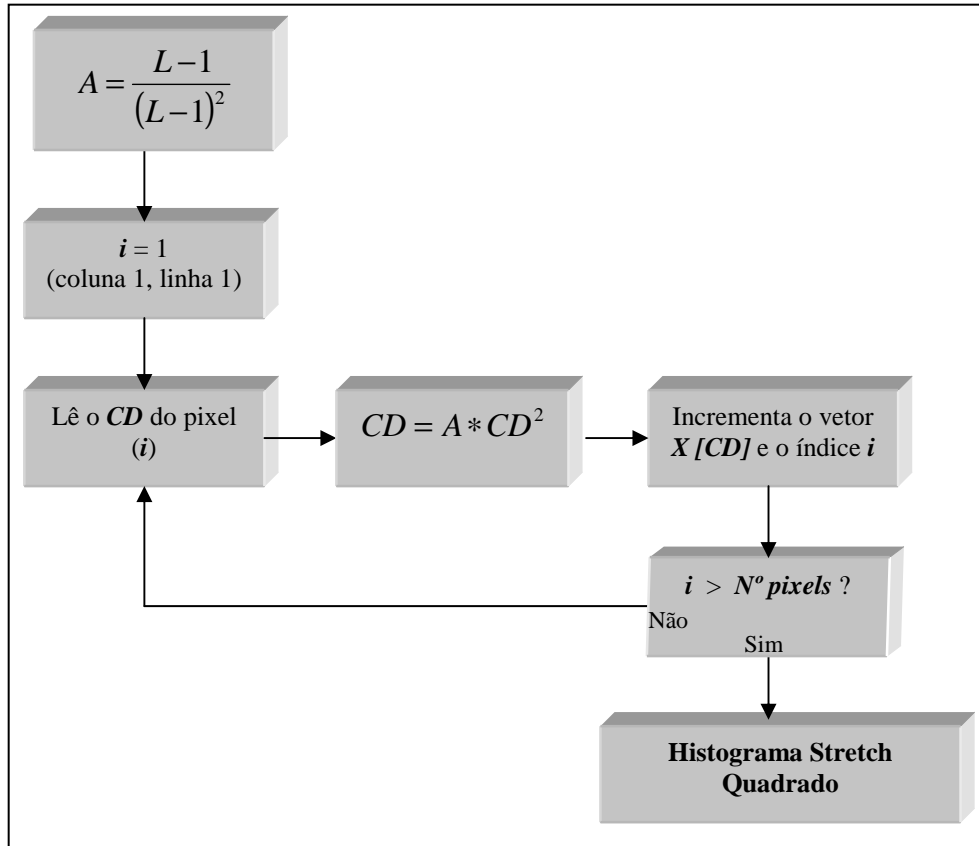


Figura 59: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Quadrado do histograma.

Stretch Logaritmo

Da mesma forma que os dois casos anteriores, a aplicação do *Stretch Logaritmo* no histograma de uma imagem segue praticamente o mesmo procedimento, alterando-se o cálculo do fator de ajuste A (Figura 60) e aplicando-se a transformação linear da Eq. 2.78 (Cap. II).

O usuário acessa esta operação sobre o histograma de sua imagem selecionando a opção “*Stretch Logaritmo*” no menu “*Selecione o tipo de histograma*” da PDASR (Figura 53).

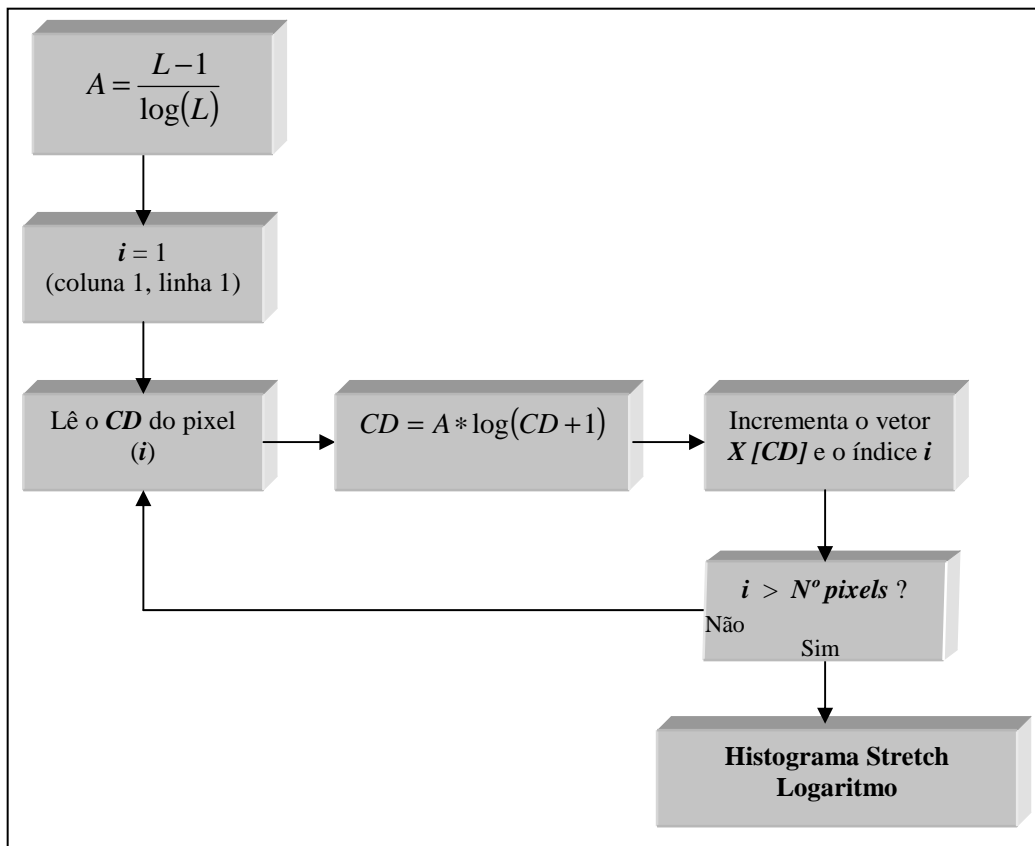


Figura 60: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Logaritmo do histograma.

Stretch Negativo

Neste tipo de Stretch, a exemplo do Stretch Linear, o usuário deve informar os valores máximo e mínimo de contadores digitais para cada canal da imagem (CD_Min e CD_Max) onde será aplicada a operação de *Stretch Negativo*. Caso não sejam alterados na página web (opção “*Stretch Negativo*” da Figura 53), serão utilizados os valores de 0 à 255 no cálculo.

Inicialmente são calculados os parâmetros A (inclinação da reta) e B (fator de incremento) a partir dos valores de CD_Min e CD_Max fornecidos.

Em seguida é feita a leitura dos valores de CD de cada pixel da imagem ($i = 1, 2, \dots, N$), realizando a transformação linear da Eq. 2.79 afim de obter-se um novo valor de CD para este pixel. Este valor é adicionado ao vetor $X[CD]$, o qual representa o histograma de saída.

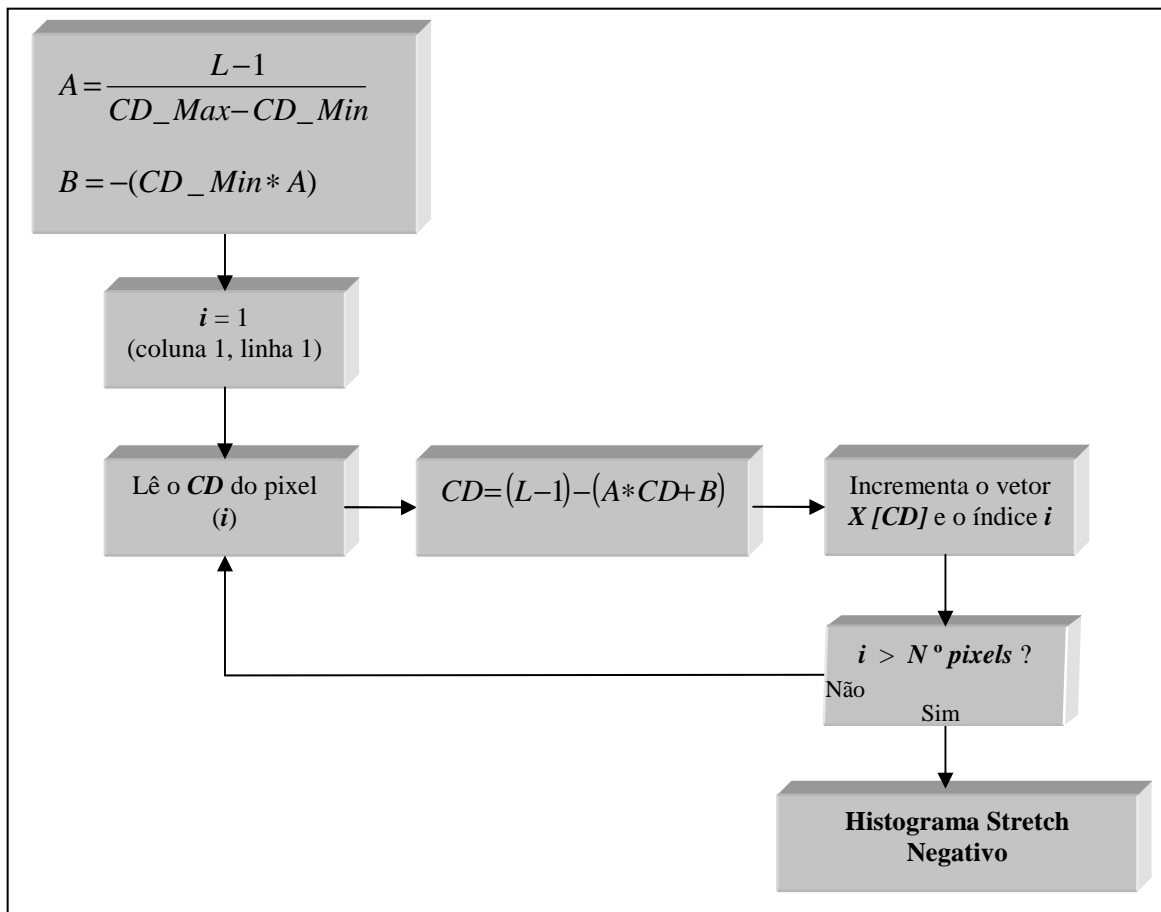


Figura 61: Diagrama representando o algoritmo para geração do Stretch Negativo do histograma.

3.2.2.2 Aplicação das Técnicas de Manipulação do Histograma em Imagens de SR

No acesso à *PDASR* o usuário dispõe de uma função onde pode aplicar diretamente em uma imagem as técnicas de manipulação do histograma vistas na seção 2.7.4. O layout deste item da página web está apresentado na Figura 62, onde podem ser selecionadas as seguintes opções:

- Seleção do arquivo com a imagem do usuário;
- Canal ou canais da imagem onde serão aplicadas as operações;
- Necessidade ou não de mostrar o histograma resultante;
- Valores limites de *CD* para os *Stretch* Linear e Negativo;
- Técnica a ser aplicada na imagem;

Operações com o Histograma da Imagem

Selecione a imagem

Selecione o canal

Selecione o tipo de histograma

Valores limites de Contadores Digitais (Stretch)

Canal 1:	CD Min:	<input type="text" value="0"/>	CD Max:	<input type="text" value="255"/>
Canal 2:	CD Min:	<input type="text" value="0"/>	CD Max:	<input type="text" value="255"/>
Canal 3:	CD Min:	<input type="text" value="0"/>	CD Max:	<input type="text" value="255"/>

- Aplicar Equalização na Imagem
- Aplicar Stretch Linear na Imagem
- Aplicar Stretch Raiz Quadrada na Imagem
- Aplicar Stretch Quadrado na Imagem
- Aplicar Stretch Logaritmo na Imagem
- Aplicar Stretch Negativo na Imagem
- Não aplica na imagem

Figura 62: Página web para aplicação das técnicas de manipulação do histograma diretamente na imagem do usuário.

Quando as técnicas descritas acima são aplicadas diretamente sobre os **CD**'s dos pixels de uma imagem, a fim de retornar uma nova imagem modificada, e não simplesmente ao seu histograma, os algoritmos para executar estas operações diferem em alguns itens dos que foram descritos na seção anterior.

3.2.2.2.1 Aplicação de Equalização na Imagem

Para aplicação da Equalização do histograma em uma imagem o usuário deve, após selecionar o arquivo de imagem a ser modificado, marcar a caixa de seleção “*Aplicar Equalização na Imagem*” e pressionar o botão “*Executar*” (Figura 62). Após o processamento da solicitação uma nova janela do navegador será aberta, contendo um *link* para que seja efetuado o *download* da imagem modificada.

O algoritmo para aplicação da Equalização em uma imagem segue a mesma rotina empregada para equalizar o histograma até a etapa da obtenção do histograma acumulado e cálculo do fator de escala (Figura 52). A partir daí é executada uma segunda leitura dos **CD**'s dos pixels da imagem ($i=1,2,\dots,N$), obtendo-se, pixel à pixel, um novo valor de **CD** através da multiplicação do valor do histograma acumulado na posição **CD** com o Fator de escala (Eq. 2.80 apresentada no Cap. II).

O valor de **CD** obtido é gravado em uma nova variável, responsável por armazenar a informação de **CD** de cada pixel da nova imagem. Depois de realizada esta operação para os N pixels da imagem original, a imagem de saída é gerada com base nos valores armazenados.

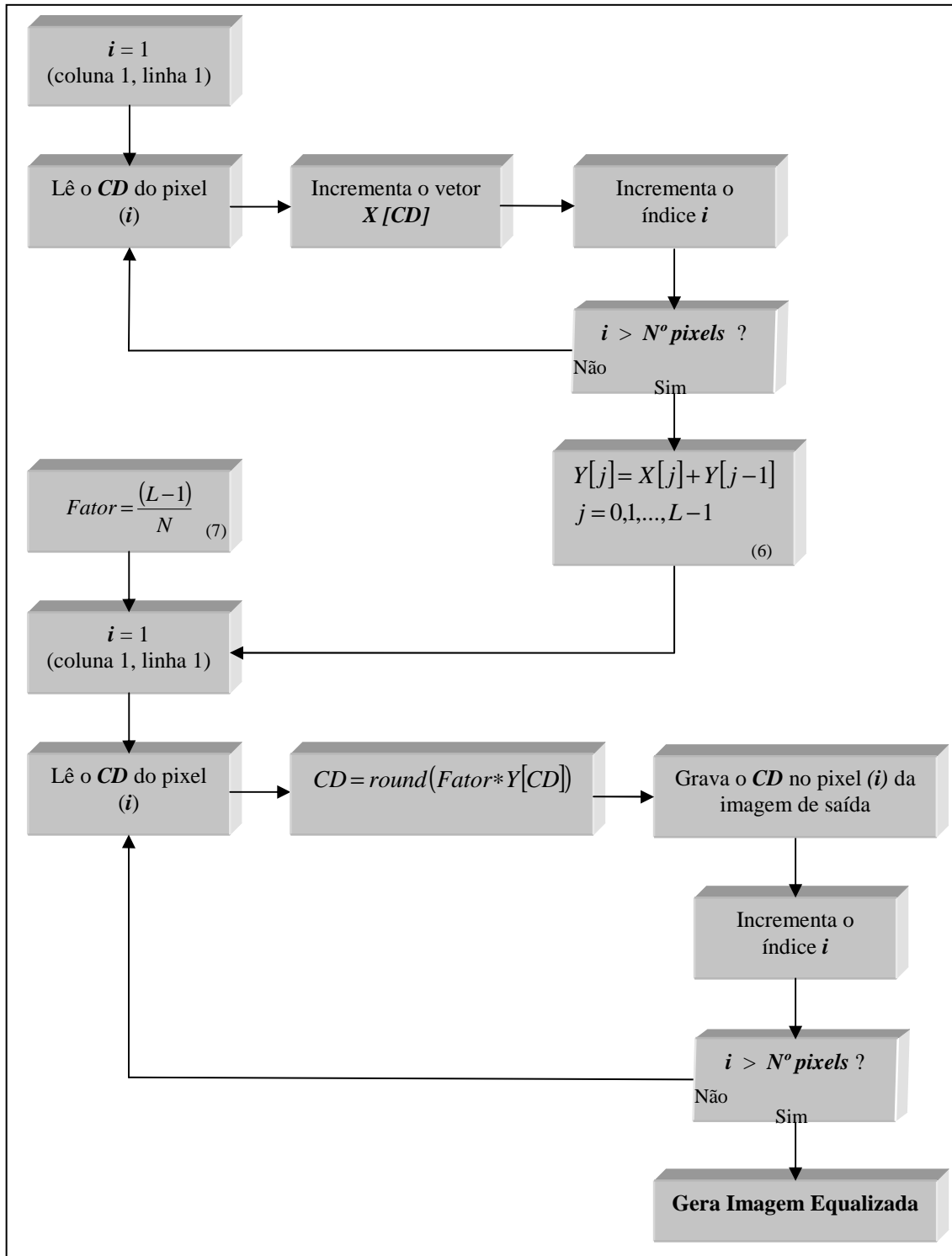


Figura 63: Diagrama representando o algoritmo para aplicação da Equalização em uma imagem.

3.2.2.2.2 Aplicação de Stretch na Imagem

De maneira semelhante à aplicação da Equalização do histograma em uma imagem, o usuário deve indicar o caminho para o arquivo de imagem a ser modificado, escolhendo em

seguida uma das cinco opções de *Stretch* disponíveis na *PDASR*. Para esta operação também será enviado para o usuário um link para o *download* da nova imagem.

Na Figura 64 é apresentado um diagrama genérico, o qual poderá ser entendido para os cinco tipos de *Stretch*. Na célula (1) são calculados os coeficientes relativos a cada tipo de *Stretch*, sendo estes representados pelas equações abaixo:

Linear e Negativo

$$A = \frac{L-1}{CD_Max - CD_Min} \quad (3.1)$$

$$B = -(CD_Min * A) \quad (3.2)$$

Raiz Quadrada

$$A = \frac{L-1}{\sqrt{L-1}} \quad (3.3)$$

Quadrado

$$A = \frac{L-1}{(L-1)^2} \quad (3.4)$$

Logaritmo

$$A = \frac{L-1}{\log(L)} \quad (3.5)$$

Inicia-se então a leitura dos valores de *CD* de cada pixel da imagem ($i=1,2,\dots,N$). Pixel à pixel, é calculado um novo valor de *CD* (célula 4) através das Equações (2.75) à (2.79), sendo este valor arredondado, pois deve corresponder a um valor de nível de cinza (valores inteiros).

No Stretch pode ocorrer perda de informação, o que no nosso caso significa obter valores negativos ou maiores que o maior nível de cinza possível (L). Neste caso, os valores devem ser reduzidos para 0 ou para L , respectivamente.

O valor de CD obtido é gravado em uma nova variável, responsável por armazenar a informação de CD de cada pixel da nova imagem. Depois de realizada esta operação para os N pixels da imagem original, a imagem de saída é gerada com base nos valores armazenados.

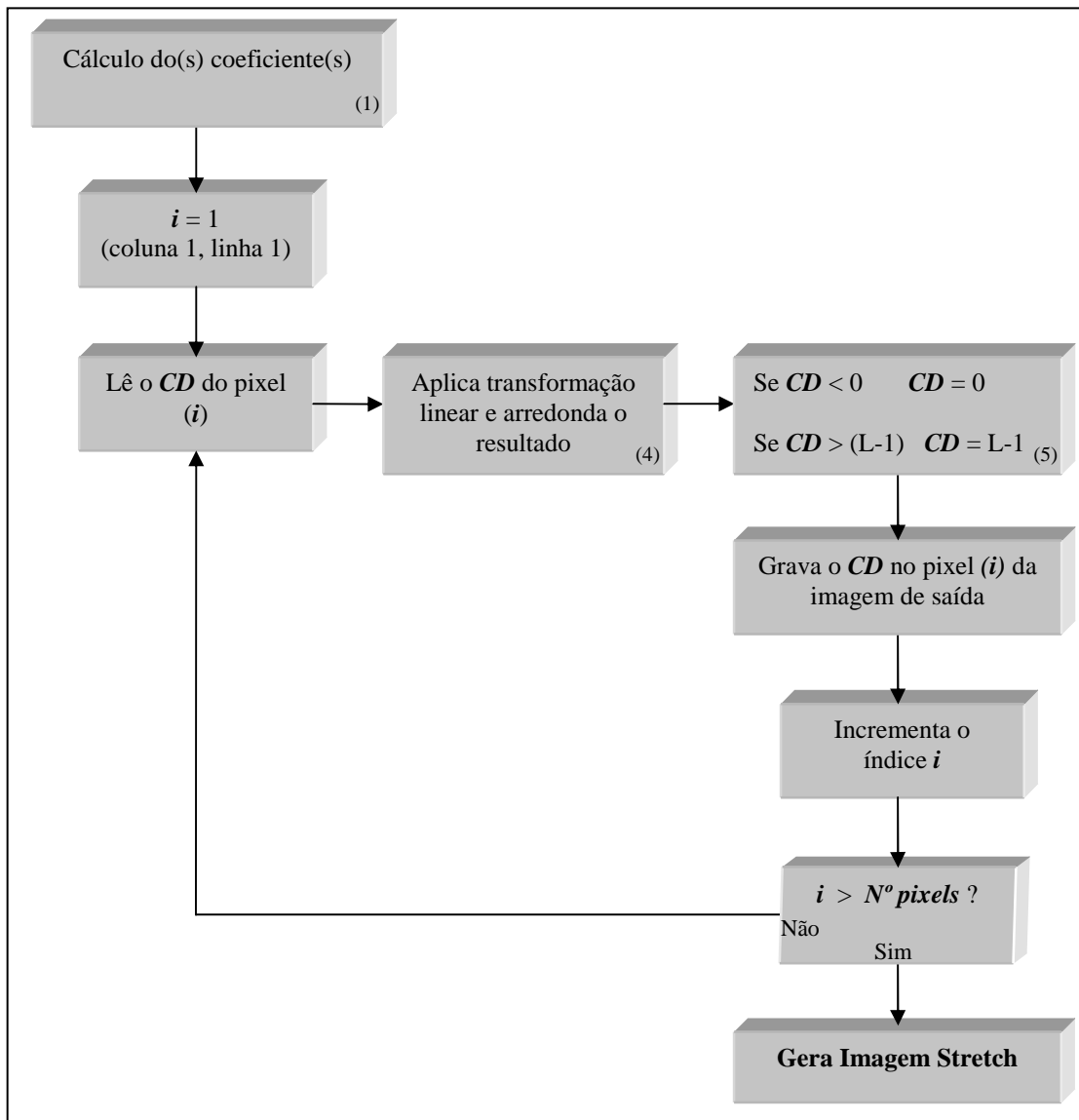


Figura 64: Diagrama representando o algoritmo para aplicação do Stretch em uma imagem.

3.2.2.2.3 Matching entre 2 Imagens

O *Matching*, ou Ajuste de Histograma, compara os histogramas acumulados da imagem de entrada com a imagem de referência, transformando a imagem de entrada em uma nova imagem, fazendo com esta tenha um brilho semelhante à imagem de referência.

Na *PDASR* o usuário tem opção de realizar o Matching entre duas imagens, indicando o caminho dos arquivos da imagem de entrada (que será modificada) e da imagem que servirá de referência. Em seguida deve marcar caixa de seleção “*Aplicar Matching nas Imagens*” e clicar no botão “*Executar*” (Figura 65).

Matching entre 2 Imagens

Selecione a imagem a ser modificada

C:/Imagem_modificar.tif Procurar...

Selecione a imagem de referência

C:/Imagem_referencia.tif Procurar...

Visualizar histograma resultante
 Aplicar Matching nas Imagens

Executar

Figura 65: Página web para aplicação de Matching entre duas Imagens.

O algoritmo implementado na execução desta técnica pode ser visualizado na Figura 66 na forma de um diagrama em blocos.

Inicialmente são calculados os histogramas acumulados das duas imagens (processo visto na Figura 54). A seguir é calculado um *Fator* que relaciona o número de pixels das imagens de referência e de entrada.

O próximo passo é iniciar um laço de repetição ($i = 0, 1, \dots, L-1$) o qual definirá um novo vetor cujos valores serão aplicados na imagem de entrada. Dentro deste laço é calculado a variável NN , que armazena a informação do número de pixels do histograma acumulado da imagem de entrada no $CD(i)$.

Ainda dentro deste laço é iniciado um segundo laço de repetição que procura no histograma acumulado da imagem de referência o **CD** (**j**) que possui o número de pixels (**i**). Quando o índice (**i**) tiver percorrido todos os níveis do histograma acumulado da imagem de entrada, os valores encontrados estarão em um vetor **Valor** [0,1, ... , L-1].

A última etapa consiste de uma nova leitura dos pixels da imagem de entrada (**k** = 1,2, ... , **N**), atribuindo a cada **CD** um novo valor, correspondente ao vetor **Valor [CD]**. Cada valor é gravado para formar a imagem de saída, a qual terá seu histograma alterado de acordo com a imagem de referência.

A imagem resultante é disponibilizada ao usuário por meio de um *link* aberto em nova janela do navegador.

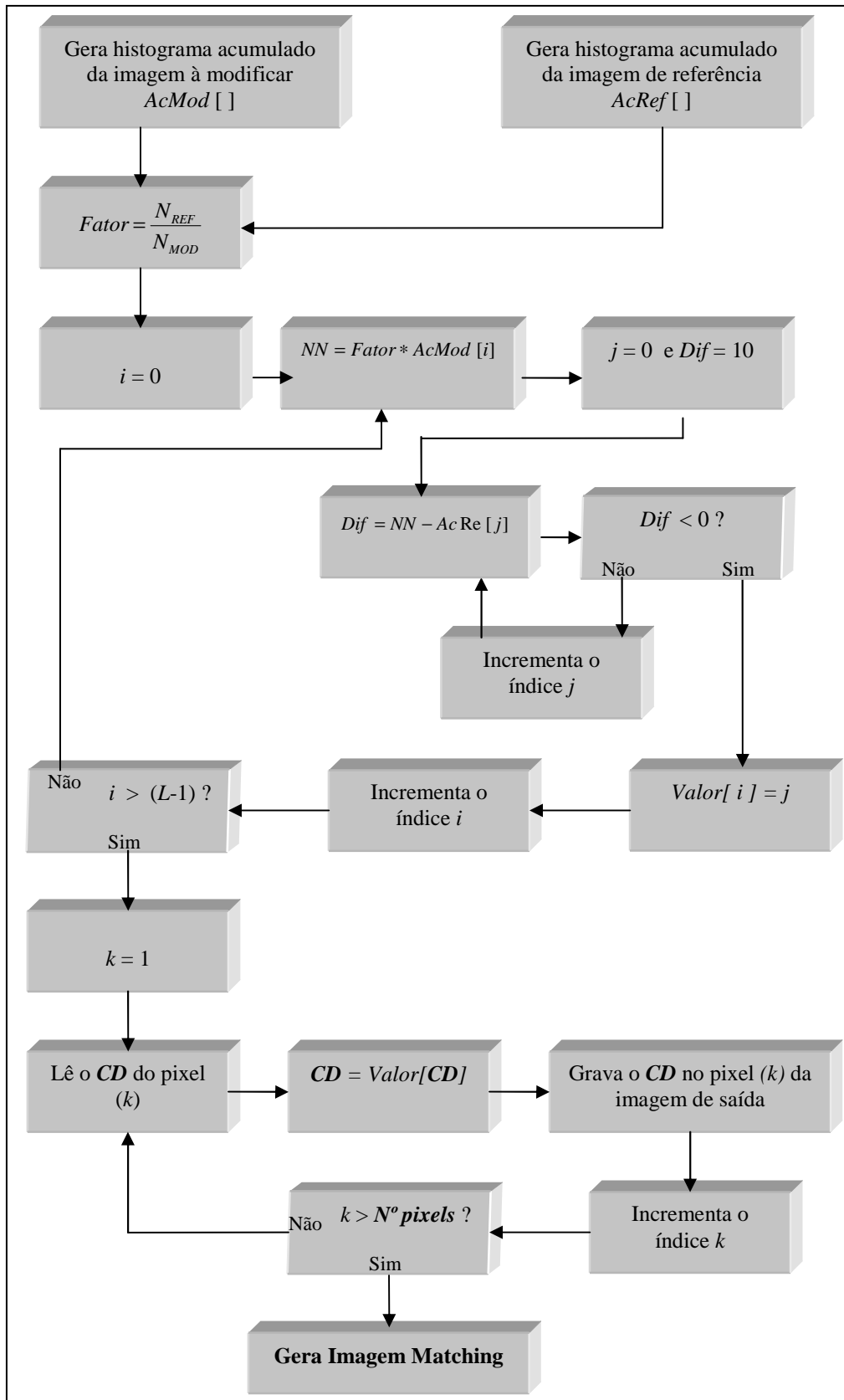


Figura 66: Diagrama representando o algoritmo para aplicação do Matching entre duas imagens.

3.2.2.3 Transformação entre Sistemas de Cores

A *PDASR* oferece opção ao usuário uma ferramenta de transformação de sistema de cores RGB para HSV de uma composição colorida. Também é possível realizar a conversão de uma imagem do espaço HSV para o RGB.

A Figura 67 ilustra o módulo da *PDASR* que contém estas operações. Após selecionar o caminho para o arquivo de imagem, na guia “*Selecione a transformação*” o usuário faz a opção entre “*RGB para HSV*” ou “*HSV para RGB*”.

Além disso, no caso da imagem do usuário possuir mais de três bandas (no máximo seis), é permitida uma combinação de três bandas quaisquer para associação aos canais R, G e B. Pressionando o botão “*Executar*” é acionado um algoritmo que executa a transformação selecionada.

A interface web, intitulada "Transformação entre Sistemas de Cores", apresenta os seguintes elementos:

- Seção "Selecione a imagem": Um campo de texto contendo "C:/Imagem_teste.tif" e um botão "Procurar..."
- Seção "Selecione a transformação": Um menu suspenso com as opções "RGB para HSV", "RGB para HSV" (destacada) e "HSV para RGB".
- Seção "Selecione as bandas da imagem": Três controles deslizantes para "Canal R" (Banda 1), "Canal G" (Banda 2) e "Canal B" (Banda 3).
- Botão "Executa" na base da interface.

Figura 67: Página web para transformação entre Sistemas de Cores.

A implementação do algoritmo de transformação entre os espaços de cores RGB e HSV não é tarefa complicada, sendo descrita a seguir (Figura 68).

Inicialmente a imagem deve ser “lida” pixel à pixel, identificando-se os valores de *CD* das três bandas, armazenando-se nas variáveis *R,G,B*. Após, são identificados nas variáveis *Max* e *Min*, o maior e o menor valor de (*R,G,B*) respectivamente. Estes dois valores serão

utilizados no cálculo do Matiz (*Hue* - H), da Saturação (*Saturation* - S) e do Brilho (*Value* - V), nas Equações (2.2), (2.4) e (2.4).

Os valores de (H, S, V) são gravados para formar a imagem de saída, incrementando-se o índice i até que o último pixel da imagem seja lido e transformado.

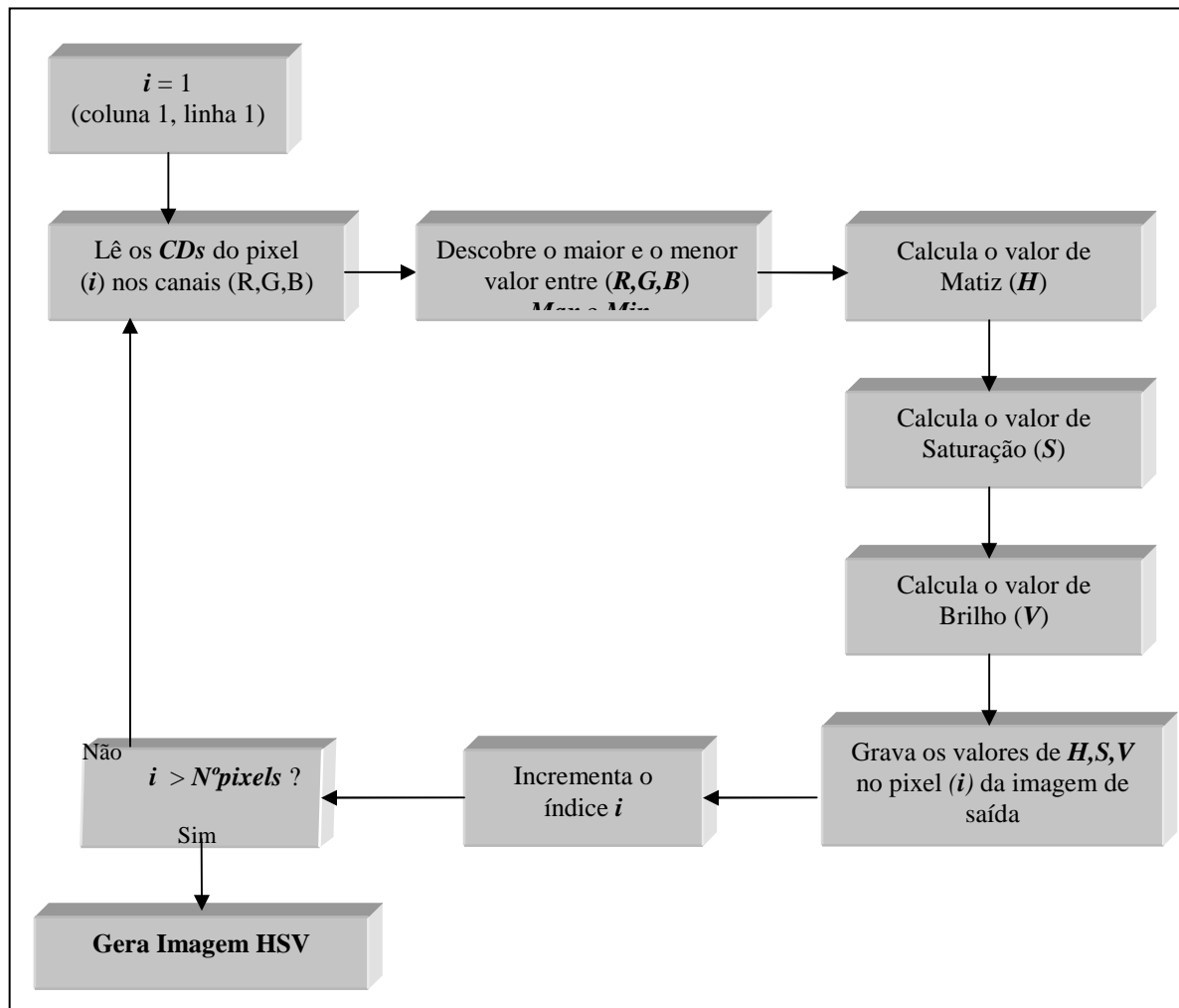


Figura 68: Diagrama representando o algoritmo para transformação de uma imagem no espaço RGB para HSV.

A transformação inversa (HSV para RGB) é efetuada de maneira semelhante, utilizando-se as Equações (2.6) à (2.10), descritas no Capítulo II.

3.2.2.4 Fusão de Imagens

A técnica de *Fusão* combina imagens de diferentes características espectrais e espaciais para sintetizar uma nova imagem com melhor resolução espacial do que a imagem

multiespectral original. Na *PDASR* estão implementadas duas técnicas de fusão de imagens, uma utilizando modelos de domínio espectral (Transformação IHS) e outra utilizando o modelo algébrico (Cor Normalizada).

Acessando a página web, além do caminho dos arquivos das imagens multiespectral e pancromática, o usuário deve preencher o tamanho do pixel de cada imagem (em metros), selecionando em seguida o método de fusão, pressionando o botão “*Combinar Imagens*” (Figura 69).

The screenshot shows the 'Fusão de Imagens' (Image Fusion) module interface. On the left side, there are two buttons: '1 Arquivo RGB + Pan' and '3 Arquivos R-G-B + Pan'. The main area contains two sections for file selection. The first section is titled 'Selecione o arquivo com as 3 bandas' and has a text box containing 'D:\imagens\Multi_REC.tif' and a 'Procurar...' button. Below it, 'Tamanho do pixel:' is followed by a text box with '2.4' and the word 'metros'. The second section is titled 'Selecione o arquivo pancromático' and has a text box containing 'D:\imagens\Panora_REC.tif' and a 'Procurar...' button. Below it, 'Tamanho do pixel:' is followed by a text box with '0.6' and the word 'metros'. There is a checked checkbox labeled 'Deletar imagens após processamento !!'. At the bottom, there is a section titled 'Método de Fusão' with a dropdown menu showing 'Cor Normalizada' selected, and a 'Combinar Imagens' button.

Figura 69: Módulo de Fusão de Imagens da *PDASR*.

3.2.2.4.1 Fusão por transformação IHS

O primeiro passo do método de fusão por transformação IHS é o cálculo de um *Fator* que relaciona o tamanho dos pixels das duas imagens. Inicia-se então o processo de leitura dos *CD*'s do primeiro pixel da imagem multiespectral (Figura 70), transformando-se os valores obtidos (*RGB*) para o espaço de cores *IHS* (formulação apresentada no Cap. II).

Passa-se à leitura da imagem pancromática, substituindo a componente I , calculado na etapa anterior, pelo valor de CD lido. Os valores de CD , H e S são transformados novamente para o espaço de cores RGB e gravados na imagem de saída.

Ainda de posse dos valores RGB iniciais do primeiro pixel da imagem multiespectral, os CD 's dos pixels da imagem PAN continuam a ser lidos até que se atinja a área na imagem PAN (pixel menor) correspondente à imagem multiespectral (pixel maior), realizando-se a cada pixel da PAN o procedimento de substituição anteriormente descrito.

A repetição do procedimento acima continua até que sejam lidos todos os pixels da imagem multiespectral. A imagem de saída terá resolução espacial e quantidade de pixels igual à da imagem pancromática, com características de cores relativas à imagem multiespectral.

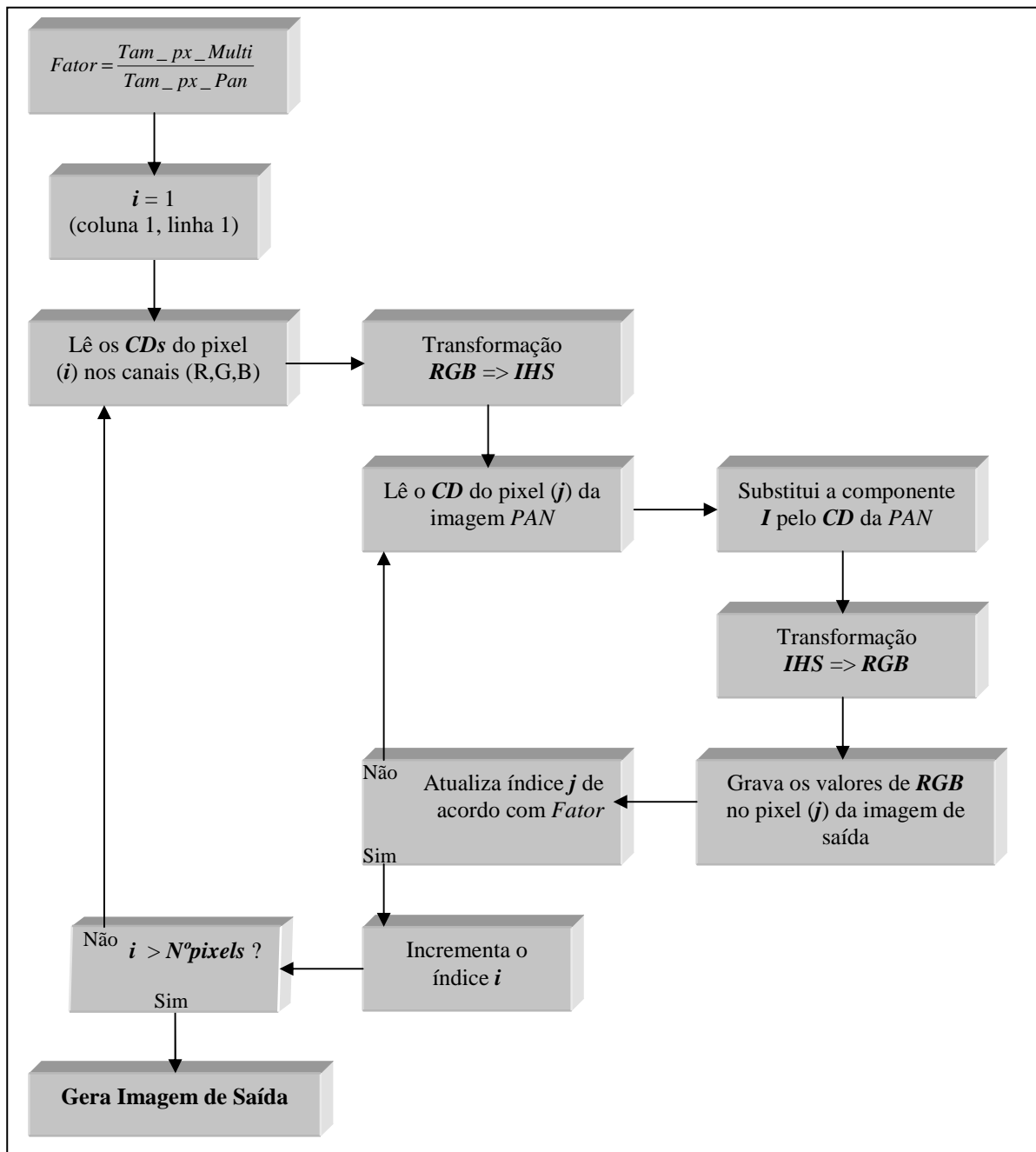


Figura 70: Diagrama representando o algoritmo para fusão de imagens por transformação IHS.

3.2.2.5 Correções Geométricas

Conforme descrito no Capítulo II, por Correção Geométrica entende-se como o processo que visa corrigir as distorções geométricas internas de uma imagem, causadas pelo sensor, pela plataforma e pela geometria de imageamento. Na *PDASR* encontra-se implementado apenas o georreferenciamento de imagens. A disponibilização da técnica de registro de imagens estará contemplada em uma próxima etapa.

3.2.2.5.1 Georreferenciamento

O *Georreferenciamento* de uma imagem pode ser obtido através da *PDASR*, no módulo representado na Figura 71. O usuário deve, previamente, possuir as coordenadas dos pontos de controle homólogos nos dois sistemas (Imagem e Carta) em dois arquivos de formato texto (*.txt), estando os valores das coordenadas formatados dentro dos arquivos conforme Figura 72.

Após adicionar o caminho para os arquivos de coordenadas, o usuário deve selecionar a imagem a ser georreferenciada, indicando o tamanho do pixel (resolução espacial) em metros, pressionando o botão “*Georreferenciar Imagem*”.

Georreferenciamento de Imagens

Selecione o arquivo com as coordenadas no sistema original (x,y)

C:/Coordenadas_Carta.txt

Selecione o arquivo com as coordenadas no sistema de referência (X,Y)

C:/Coordenadas_Imagem.txt

Selecione a imagem para aplicação dos parâmetros acima

C:/Imagem_teste.tif

Digite o tamanho do pixel

metros

Figura 71 – Módulo da *PDASR* com a função de georreferenciamento de imagens de SR.

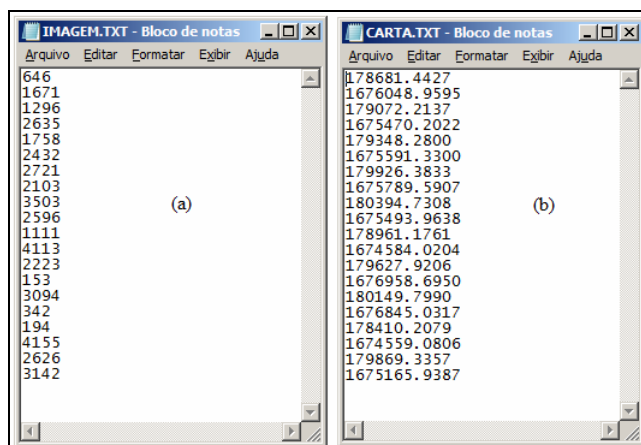


Figura 72 – Exemplos de arquivos texto com grupo de 10 coordenadas no sistema original (a) e no sistema de referência (b).

O algoritmo de georreferenciamento implementado na *PDASR* pode ser dividido em duas etapas: a primeira caracteriza-se por determinar os parâmetros de transformação entre os dois sistemas (**Transformação Geométrica**) enquanto a segunda etapa faz a leitura da imagem de entrada, calcula a nova posição de cada pixel (**Mapeamento Inverso e Reamostragem**) e gera a imagem de saída corrigida. A Figura 73 demonstra em forma de diagrama o algoritmo descrito a seguir.

A etapa inicial estabelece uma relação entre coordenadas de imagem (linha e coluna) e coordenadas geográficas (latitude e longitude), a partir dos arquivos no formato texto enviados pelo usuário. Encontra-se implementado o Modelo Polinomial, utilizando-se uma Transformação Afim calculada através do Método de Ajustamento Paramétrico (Cap. II).

A partir das equações matemáticas da transformação Afim, aplicada para vários pontos, pode-se definir um valor residual, resultante da aplicação dos valores verdadeiros dos pontos e seus valores calculados pelo modelo.

Apresentando em sua forma matricial temos:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \vdots \\ X_n \\ Y_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 & 0 & 1 \\ x_2 & y_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & x_n & y_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ C_x \\ C_y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Sendo

$$V = R - A \cdot P \quad (3.7)$$

Onde:

V : vetor dos resíduos;

R : vetor com as coordenadas da carta;

A : matriz com as derivadas parciais das equações da transformação Afim;

P : vetor dos parâmetros de transformação a serem calculados;

Executando operações matriciais e utilizando o Critério dos Mínimos Quadrados (detalhes na seção 2.4.3.2), resulta:

$$P = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot R \quad (3.8)$$

Uma vez que são utilizados vários pontos de controle, pode ser verificado quais dos pontos se ajustam melhor à transformação, através do erro médio quadrático. O erro médio quadrático deve ser inferior a 1 pixel e compatível como a resolução espacial da imagem.

$$\xi_x = X - X_{calculado} \quad (3.9)$$

$$\xi_y = Y - Y_{calculado} \quad (3.10)$$

$$\xi_i = \sqrt{(\xi_x)^2 + (\xi_y)^2} \quad (3.11)$$

Onde:

ξ_x : erro médio quadrático na direção X;

ξ_y : erro médio quadrático na direção Y;

ξ_i : erro médio quadrático calculado para cada ponto;

De posse dos parâmetros de transformação, a etapa seguinte começa pela geração do *grid* da imagem de saída. Para “preencher” a imagem de saída com os *CD*'s da imagem

original, é calculado, através de uma transformação inversa (*Mapeamento Inverso*), a posição na imagem de entrada correspondente à cada pixel da imagem de saída (Eq. 3.12 e 3.13).

$$y = \frac{a \cdot (Y - C_y) - c \cdot (X - C_x)}{(a \cdot d - b \cdot c)} \quad (3.12)$$

$$x = \frac{(Y - C_y) - (d \cdot y)}{c} \quad (3.13)$$

Onde:

x, y : posição do pixel na imagem de entrada;

X, Y : posição do pixel na imagem de saída;

a, b, c, d, C_x, C_y : parâmetros de transformação;

Pelo fato das posições x e y em geral não converterem-se em valores inteiros, faz-se necessário que estes valores sejam interpolados, a fim de obter-se um valor de coordenada de pixel que possa ser lido na imagem de entrada. Na *PDASR* encontra-se implementado o método de interpolação por “*Vizinho mais Próximo*”. Mais detalhes no Capítulo II.

Obtido o valor interpolado, o *CD* do pixel da imagem de entrada é copiado e registrado para o pixel da imagem de saída que gerou o cálculo. O processo é repetido até que sejam preenchidos todos os pixels da imagem de saída.

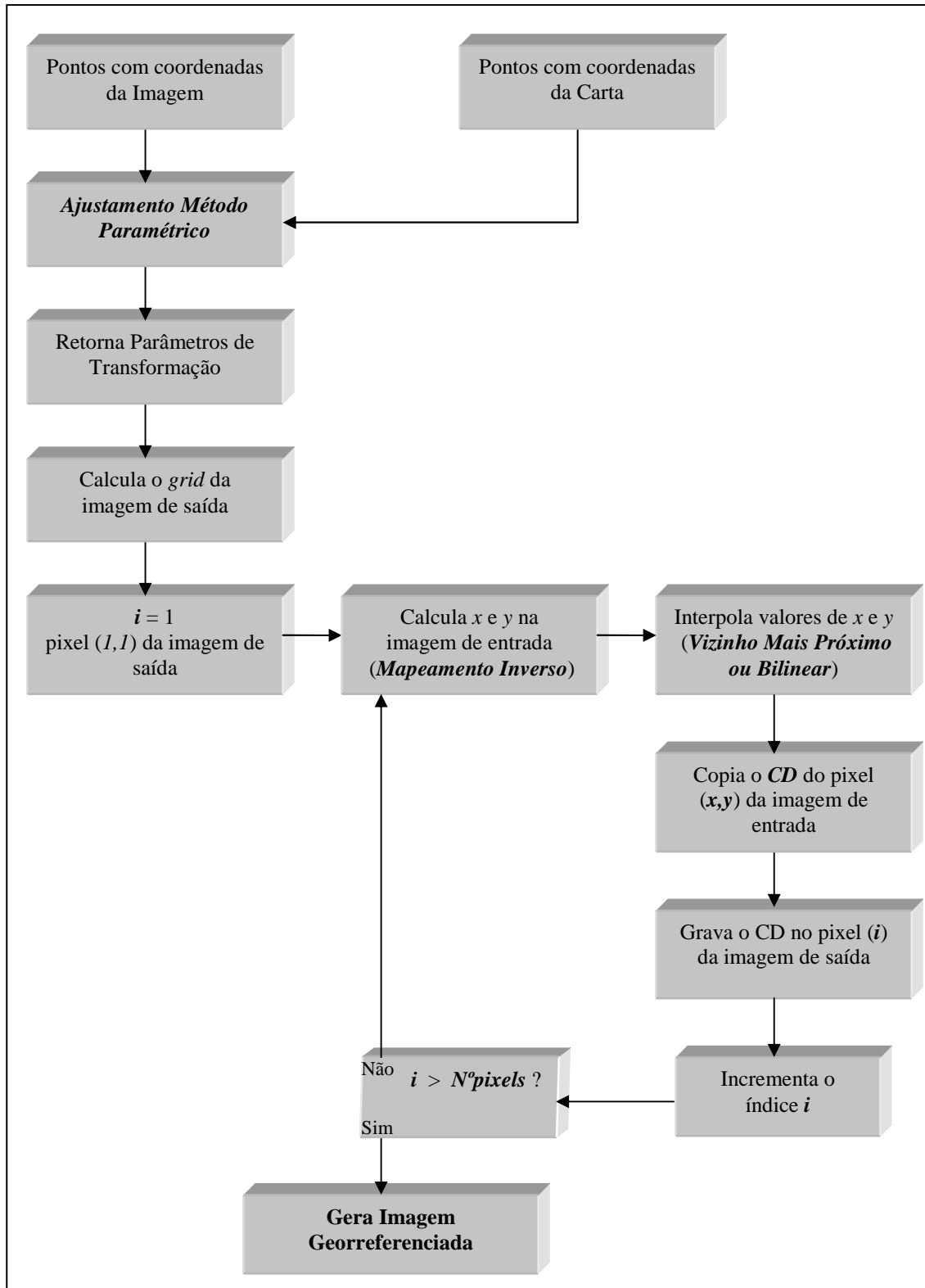


Figura 73 – Diagrama representando o algoritmo para georreferenciamento de imagens.

3.2.2.6 Filtragem Digital

Na PDASR estão implementados alguns filtros no Domínio Espacial descritos na seção 2.4.4.2, sendo:

- Filtros de Suavização (passa baixas): média simples e média ponderada;
- Filtros de Aguçamento (passa altas): Laplace e Aguçar;
- Filtros de Detecção de Bordas (passa altas): Laplace e Aguçar;
- Filtros Direcionais: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste;
- Filtro definido pelo usuário: usuário define os pesos para cada célula da máscara 3x3;

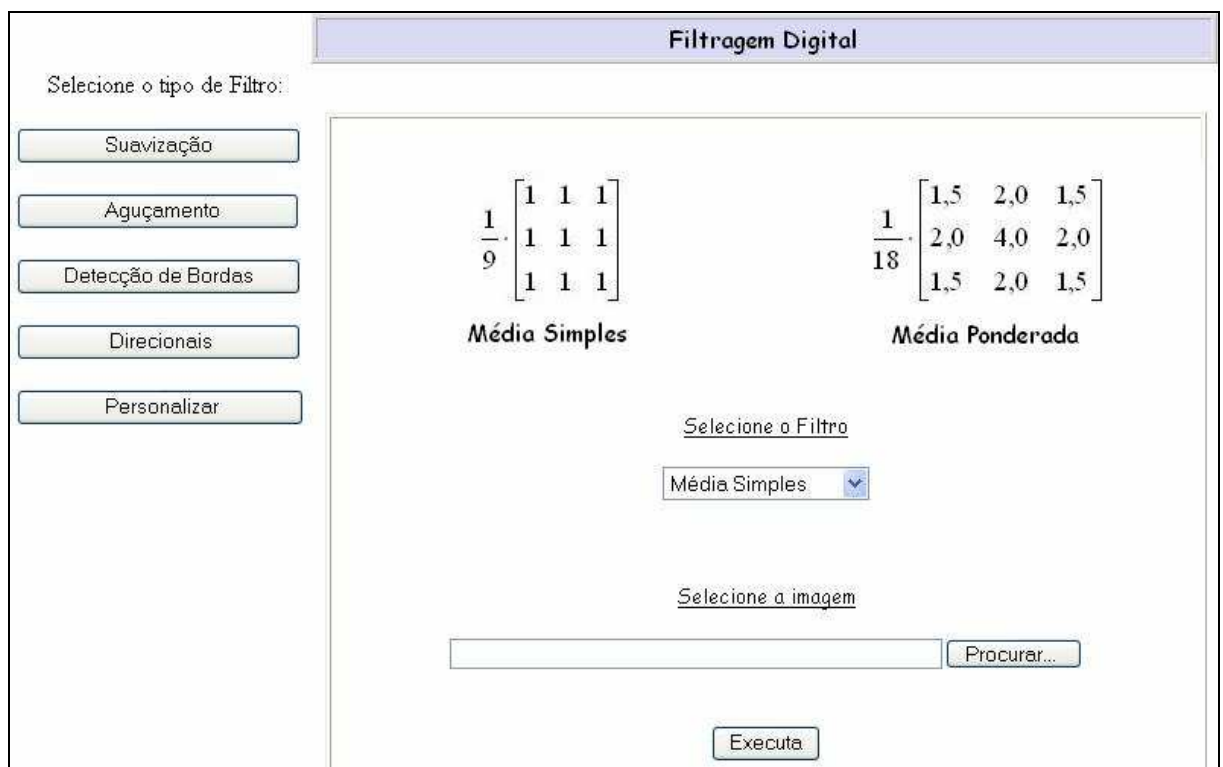


Figura 74: Módulo de Filtragem Digital da PDASR.

Na Figura 75 é apresentado o algoritmo para a aplicação da técnica de filtragem digital em imagens. A imagem é lida pixel à pixel, obtendo-se os valores dos contadores digitais do pixel central e dos 8 pixels adjacentes, aplicando-se, à cada CD lido o peso correspondente, determinado pelo tipo de filtro.

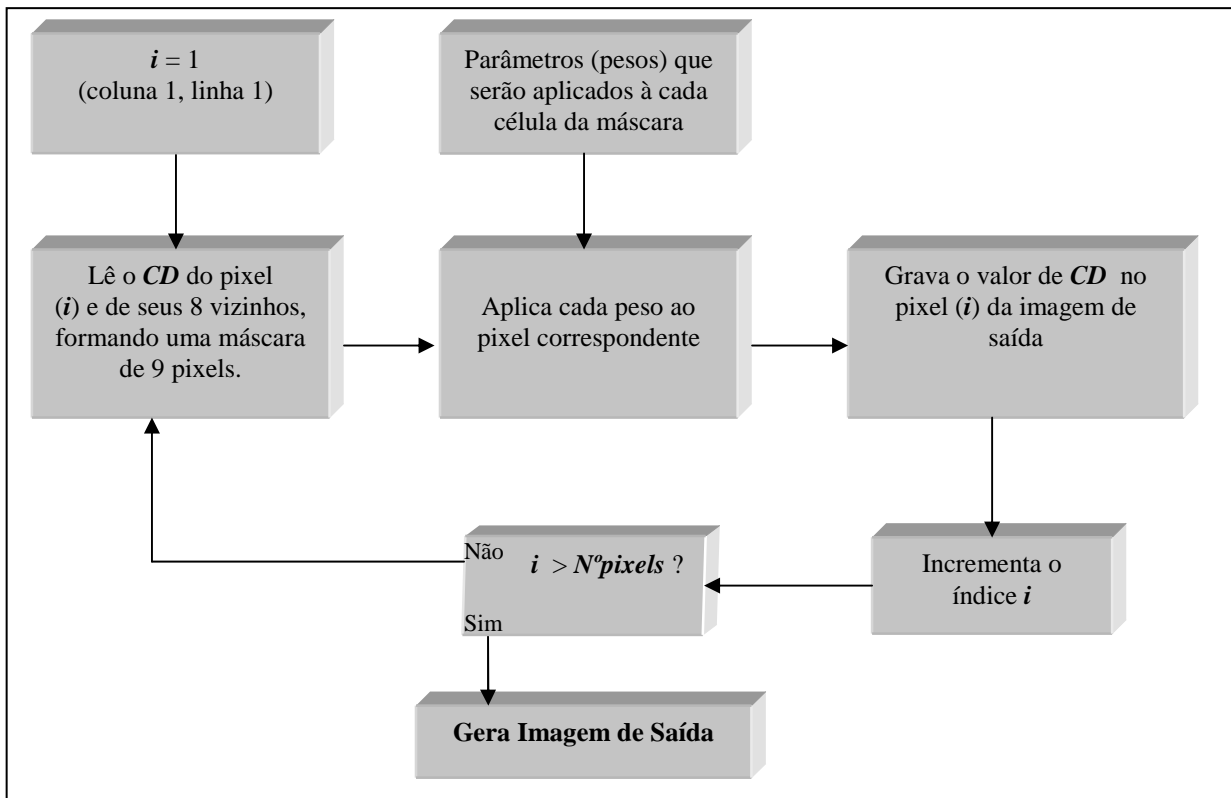


Figura 75 – Diagrama representando o algoritmo para aplicar a filtragem digital em imagens.

CAPÍTULO IV - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no Módulo de “Aplicação de Técnicas em Imagens” da *PDASR*, bem como exemplos dos textos disponibilizados. Para validação dos dados obtidos, os resultados foram comparados com os resultados de funções similares encontradas nos softwares **ENVI 3.2**, **MultiSpec 2.8** e **SPRING 3.6**.

4.1 Geração de histogramas

Para teste do algoritmo foi utilizada uma imagem do sensor ETM+ LandSat 5, com resolução radiométrica de 8 bits, formando uma composição colorida dos canais 5, 4 e 3, conforme mostrado na Figura 76.

A imagem possui 900 colunas x 900 linhas, totalizando 810.000 pixels. O arquivo, no formato TIF, possui o tamanho de 2.447.252 bytes.



Figura 76 – Imagem do sensor LandSat 5 (composição 543) utilizada como imagem teste para geração e manipulação do histograma.

4.1.1 Histograma da Imagem

Para validação dos resultados da geração do histograma de uma imagem utilizou-se a função “*Functions => Display Enhancements => Interactive Stretching*” do software **ENVI 3.2**.

Na Figura 77 são apresentados lado a lado os histogramas resultantes da PDASR e do ENVI dos canais 5, 4 e 3, respectivamente, apresentando visualmente resultados idênticos nas três bandas.

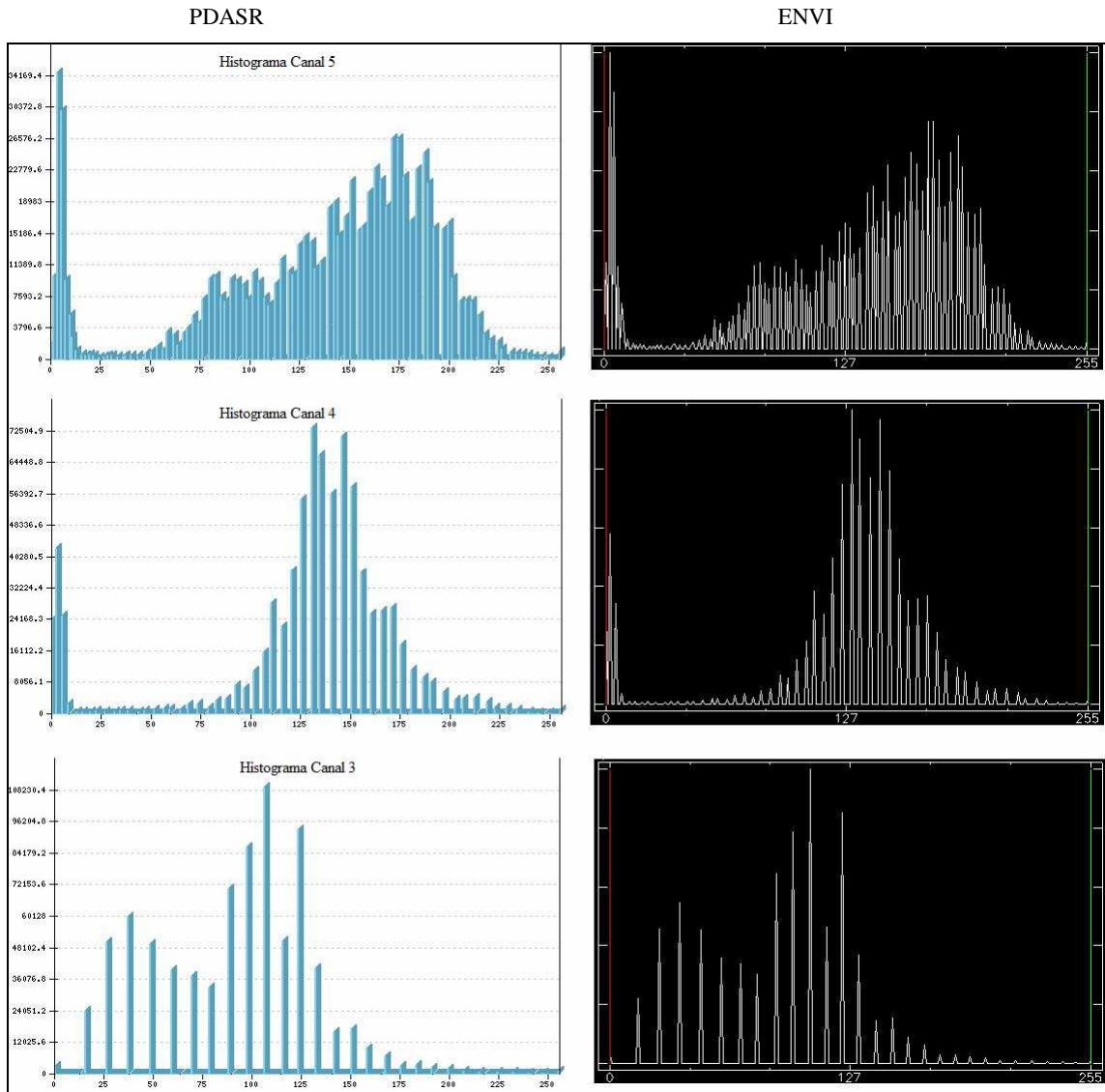


Figura 77 – Comparação entre histogramas dos canais 5, 4 e 3: PDASR e ENVI 3.2

A fim de avaliar quantitativamente os resultados obtidos, os histogramas gerados pela PDASR tiveram seus valores plotados e comparados com os resultados da função “*Processor => Histogram Image*” do software **MultiSpec 2.8**. São apresentados na Tabela 4 os valores do histograma do Canal 5, observando-se que ambos são idênticos.

Tabela 4 – Comparação dos valores dos histogramas gerados pela PDASR e MultiSpec.

CD	Canal 5	
	PDASR	MultiSpec
0	2024	2024
1	10071	10071
2	0	0
3	34514	34514
4	0	0
5	29937	29937
6	0	0
7	9572	9572
8	0	0
9	5306	5306
10	2631	2631
11	0	0
12	1037	1037
13	0	0
14	0	0
15	593	593
16	0	0
17	421	421
18	0	0
19	566	566
20	0	0
21	409	409
22	0	0
23	0	0
24	237	237
25	0	0
26	316	316
27	0	0
28	435	435
29	0	0
30	448	448
31	0	0
32	0	0
33	346	346
34	0	0
35	0	0
36	356	356
37	515	515
38	0	0
39	0	0
40	445	445
41	0	0
42	0	0
43	447	447
44	0	0
45	0	0
46	349	349
47	733	733
48	0	0
49	0	0

CD	Canal 5	
	PDASR	MultiSpec
52	0	0
53	1562	1562
54	0	0
55	0	0
56	1120	1120
57	0	0
58	3301	3301
59	0	0
60	0	0
61	2887	2887
62	0	0
63	1771	1771
64	0	0
65	0	0
66	3111	3111
67	0	0
68	3771	3771
69	0	0
70	0	0
71	5286	5286
72	0	0
73	0	0
74	4425	4425
75	0	0
76	7268	7268
77	0	0
78	0	0
79	9661	9661
80	0	0
81	0	0
82	10014	10014
83	0	0
84	0	0
85	7626	7626
86	0	0
87	6979	6979
88	0	0
89	0	0
90	9622	9622
91	0	0
92	0	0
93	9466	9466
94	0	0
95	0	0
96	8924	8924
97	0	0
98	7199	7199
99	0	0
100	0	0
101	10351	10351

CD	Canal 5	
	PDASR	MultiSpec
104	9274	9274
105	0	0
106	0	0
107	7468	7468
108	0	0
109	6496	6496
110	0	0
111	0	0
112	9053	9053
113	0	0
114	0	0
115	12006	12006
116	0	0
117	0	0
118	0	0
119	10607	10607
120	0	0
121	10197	10197
122	0	0
123	0	0
124	13692	13692
125	0	0
126	0	0
127	14627	14627
128	0	0
129	0	0
130	14132	14132
131	0	0
132	11001	11001
133	0	0
134	0	0
135	11727	11727
136	0	0
137	0	0
138	0	0
139	18152	18152
140	0	0
141	0	0
142	18910	18910
143	0	0
144	14902	14902
145	0	0
146	0	0
147	17096	17096
148	0	0
149	0	0
150	21457	21457
151	0	0
152	0	0
153	0	0

CD	Canal 5	
	PDASR	MultiSpec
156	15927	15927
157	0	0
158	0	0
159	20004	20004
160	0	0
161	0	0
162	22886	22886
163	0	0
164	0	0
165	21589	21589
166	0	0
167	0	0
168	18429	18429
169	0	0
170	0	0
171	26509	26509
172	0	0
173	0	0
174	26545	26545
175	0	0
176	0	0
177	21984	21984
178	0	0
179	0	0
180	16630	16630
181	0	0
182	0	0
183	22870	22870
184	0	0
185	0	0
186	0	0
187	24809	24809
188	0	0
189	21242	21242
190	0	0
191	0	0
192	15878	15878
193	0	0
194	0	0
195	0	0
196	15632	15632
197	0	0
198	0	0
199	16395	16395
200	0	0
201	9810	9810
202	0	0
203	0	0
204	0	0
205	6936	6936

CD	Canal 5	
	PDASR	MultiSpec
208	7145	7145
209	0	0
210	0	0
211	6931	6931
212	0	0
213	0	0
214	5248	5248
215	0	0
216	0	0
217	3001	3001
218	0	0
219	0	0
220	2379	2379
221	0	0
222	0	0
223	0	0
224	2049	2049
225	0	0
226	1339	1339
227	0	0
228	0	0
229	0	0
230	803	803
231	0	0
232	0	0
233	663	663
234	0	0
235	0	0
236	646	646
237	0	0
238	0	0
239	538	538
240	0	0
241	0	0
242	357	357
243	0	0
244	0	0
245	0	0
246	309	309
247	0	0
248	0	0
249	236	236
250	0	0
251	0	0
252	161	161
253	0	0
254	0	0
255	907	907
Total	102639	102639

50	931	931	102	0	0	154	15433	15433	206	0	0
51	0	0	103	0	0	155	0	0	207	0	0

4.1.2 Histograma Acumulado

Utilizando-se a mesma imagem do item anterior, segue na Figura 78 os histogramas acumulados obtidos na PDASR.

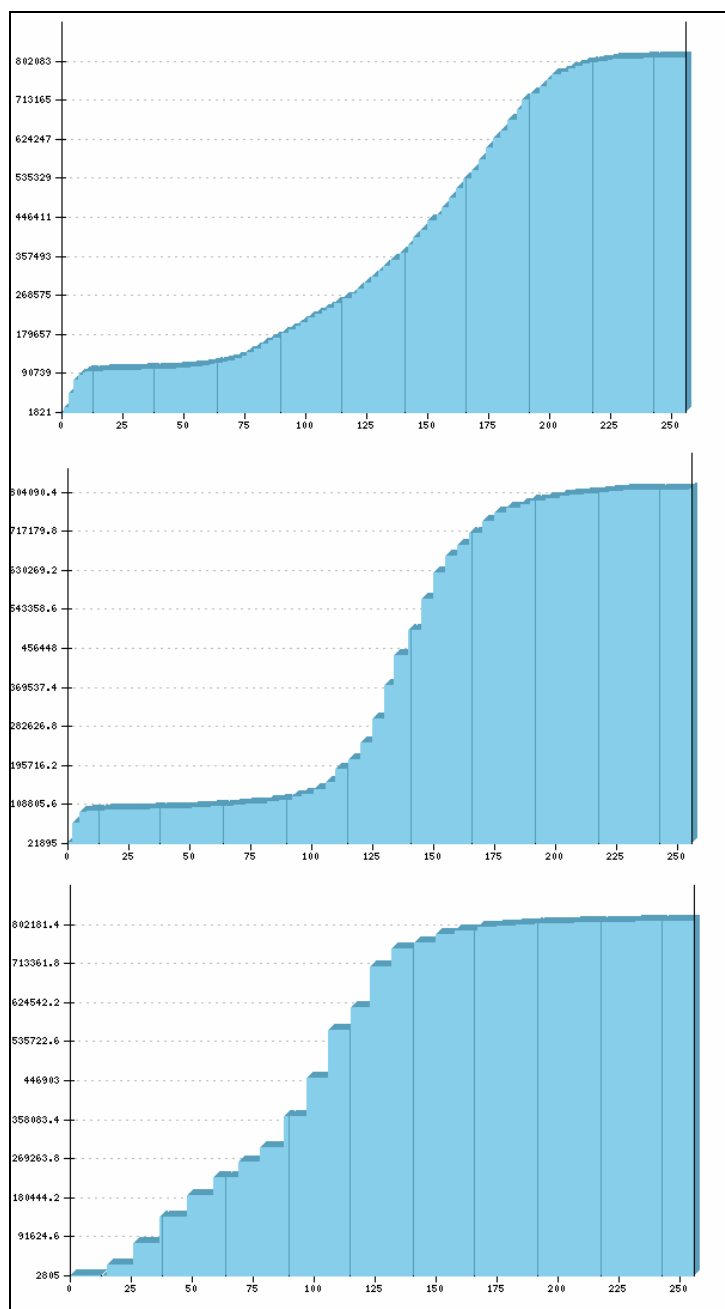


Figura 78 – Histogramas Acumulados dos canais 543.

4.1.3 Histograma Equalizado

Na validação do histograma equalizado gerado pela PDASR foi utilizada a mesma função do ENVI 3.2 descrita em 4.1.1. Os histogramas resultantes dos três canais são visualizados na Figura 79, onde nota-se a semelhança entre os gráficos.

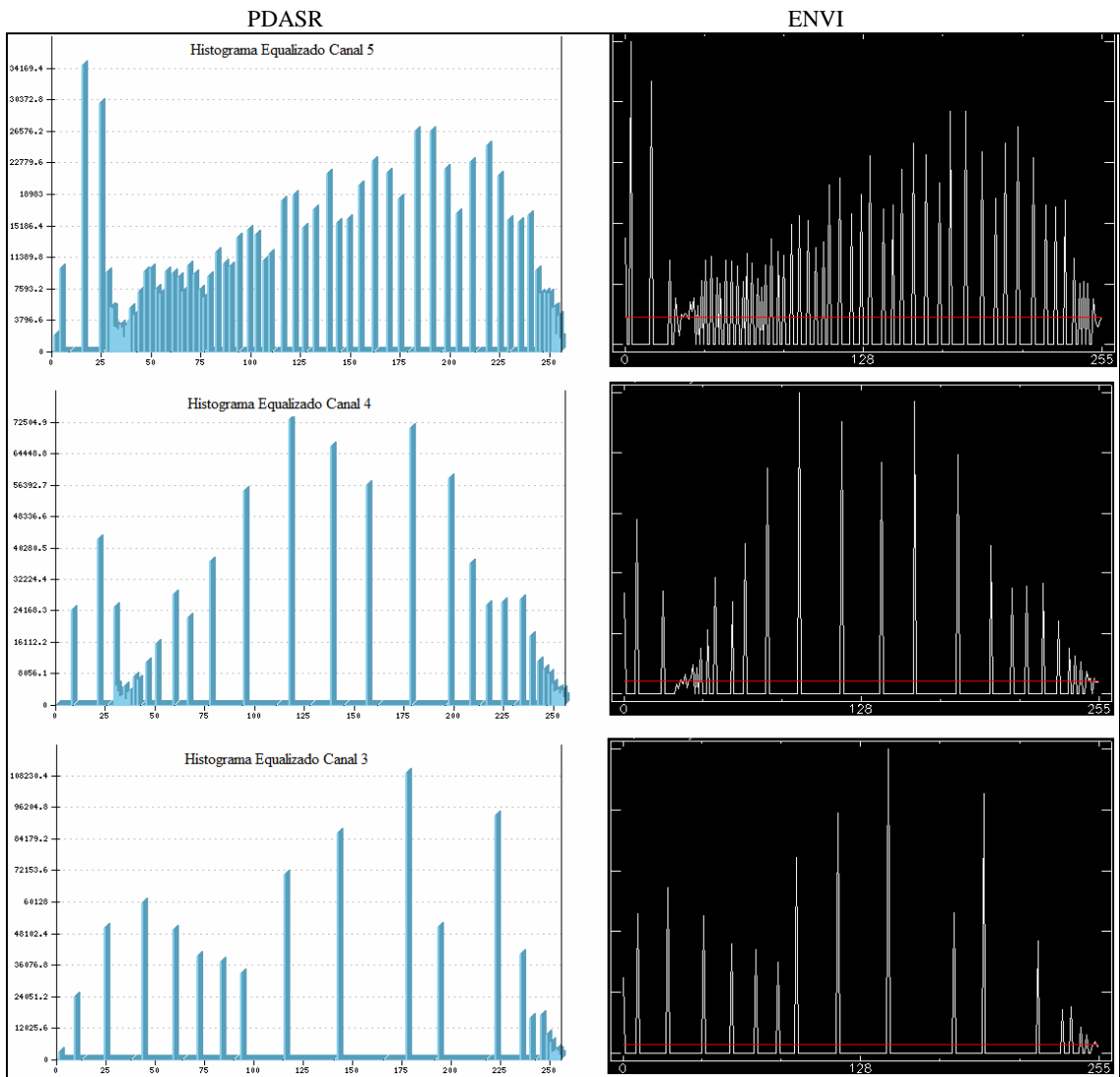


Figura 79 – Comparação entre os histogramas equalizados dos canais 5, 4 e 3: PDASR e ENVI 3.2

4.1.4 Histograma Stretch Linear

Na validação da aplicação do Stretch Linear no histograma de uma imagem foi utilizada a ferramenta “*Interactive Stretching*” do software ENVI, sendo selecionado o intervalo de contadores digitais máximo e mínimo de 50 a 150, respectivamente. No Módulo

6 da PDASR foi executado o procedimento semelhante, sendo os resultados apresentados na Figura 80.

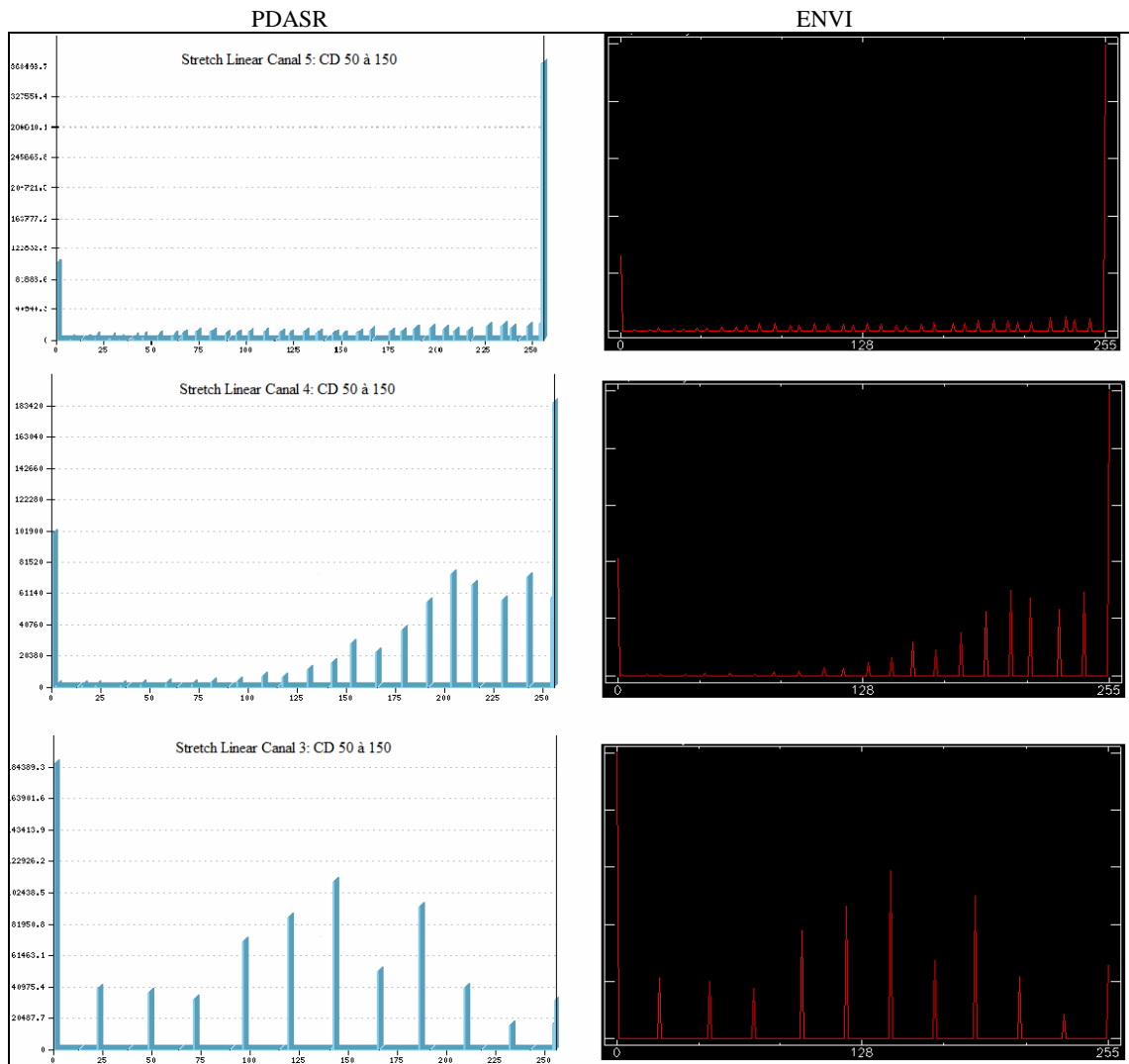


Figura 80 – Comparação entre os histogramas dos canais 5, 4 e 3: PDASR e ENVI 3.2, após a aplicação de Stretch Linear com valores de CD entre 50 e 150.

Comparando-se os três pares de histogramas (PDASR e ENVI) verifica-se que existe uma pequena diferença próximo ao final dos gráficos, decorrentes de problemas de arredondamento dos contadores digitais 254 e 255 durante a execução das operações. Porém, evidencia-se na Tabela 5 que a soma dos CD's 254 e 255 da PDASR corresponde ao resultado obtido pelo ENVI, o que causa um efeito praticamente imperceptível na imagem resultante, conforme será apresentado na Seção 4.2.2.

Tabela 5 – Comparação dos CD's dos histogramas PDASR e ENVI.

	CD	254	255	SOMA
CANAL 5	PDASR	21457	372220	393677
	ENVI	0	393677	393677

CANAL 4	PDASR	58108	185272	243380
	ENVI	0	243380	243380
CANAL 3	PDASR	16865	31762	48627
	ENVI	0	48627	48627

4.1.5 Histograma Stretch Raiz Quadrada

Os histogramas resultantes da aplicação do Stretch Raiz Quadrada aplicado nos três canais da imagem de teste pelo software ENVI e pela PDASR são visualizados na Figura 81, onde observa-se que os mesmos são idênticos.

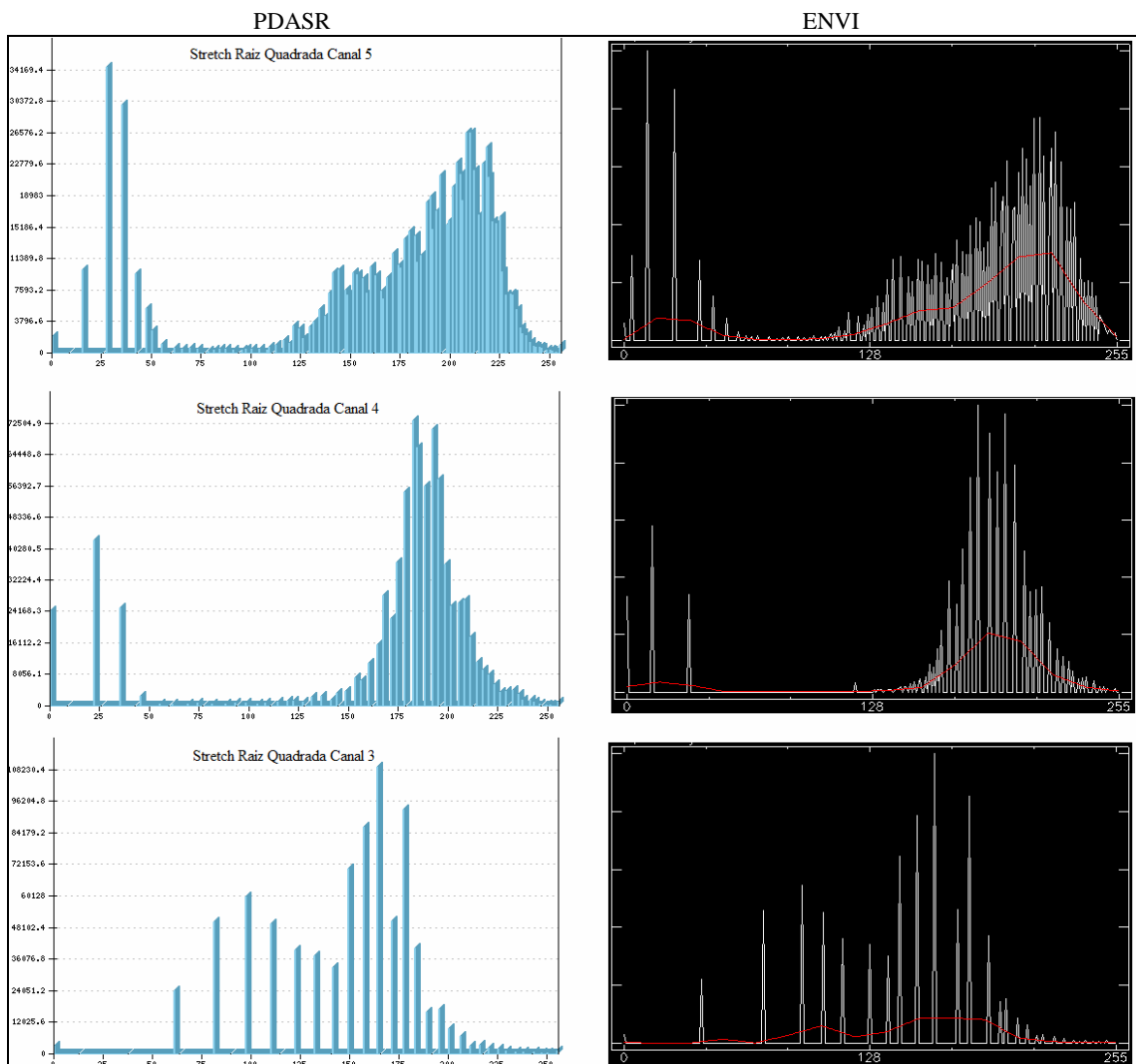


Figura 81 – Comparação entre os histogramas Stretch Raiz Quadrada dos canais 5, 4 e 3: PDASR e ENVI 3.2

4.1.6 Histograma Stretch Quadrado

Para geração do Stretch Quadrado foi utilizada a função "Imagem => Contraste" do software SPRING 3.6. Após aplicação da técnica, a imagem foi salva em formato *TIF*, tendo seus histogramas visualizados no ENVI para manter-se homogeneidade nas figuras.

Igualmente, nota-se a semelhança entre os histogramas resultantes com os gerados pela PDASR (Figura 82).

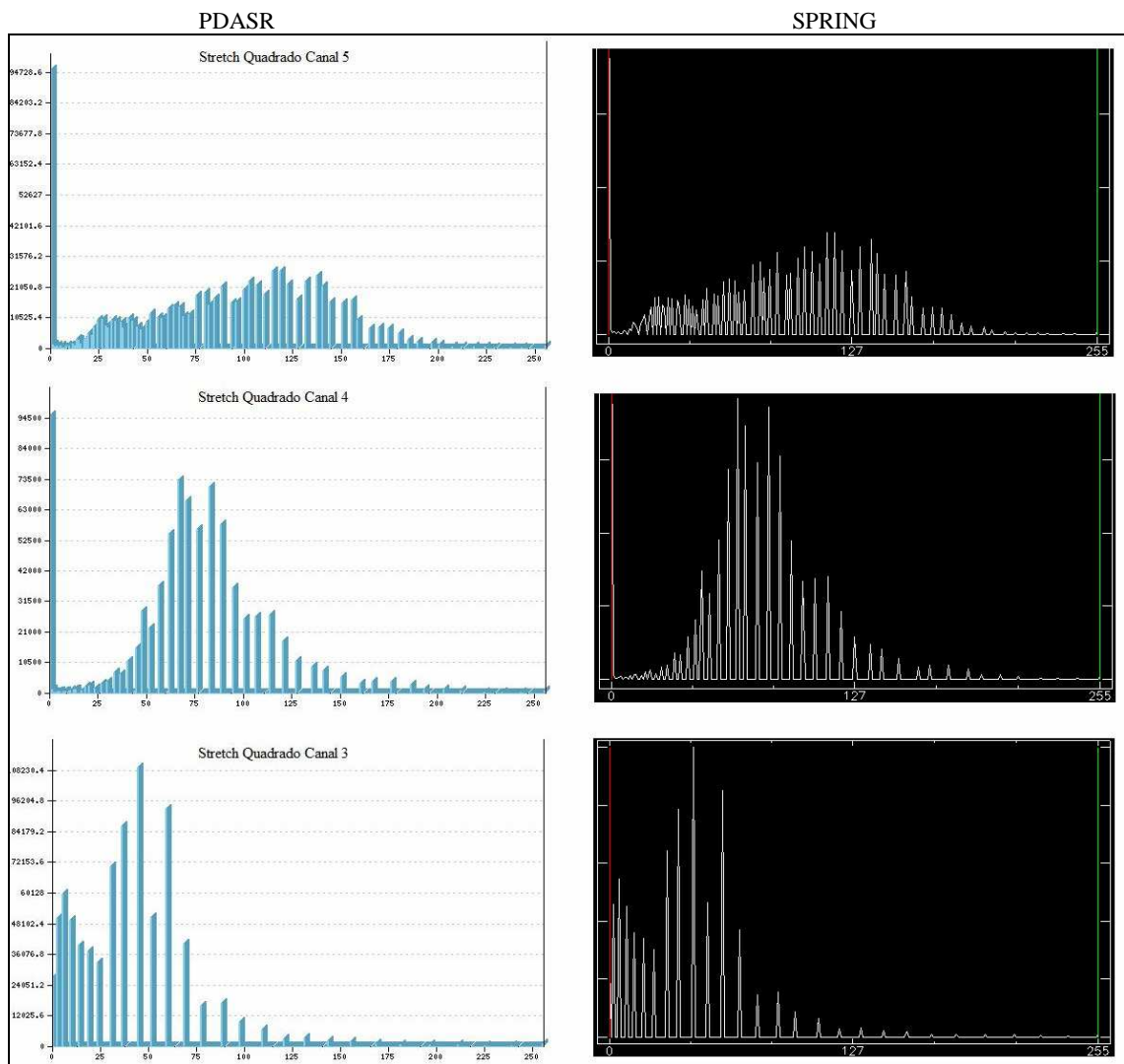


Figura 82 – Comparação entre os histogramas Stretch Quadrado dos canais 5, 4 e 3: PDASR e SPRING 3.6

4.1.7 Histograma Stretch Logaritmo

Os histogramas resultantes da aplicação do Stretch Logaritmo aplicado nos três canais da imagem de teste pelo software ENVI e pela PDASR são visualizados na Figura 83.

PDASR

SPRING

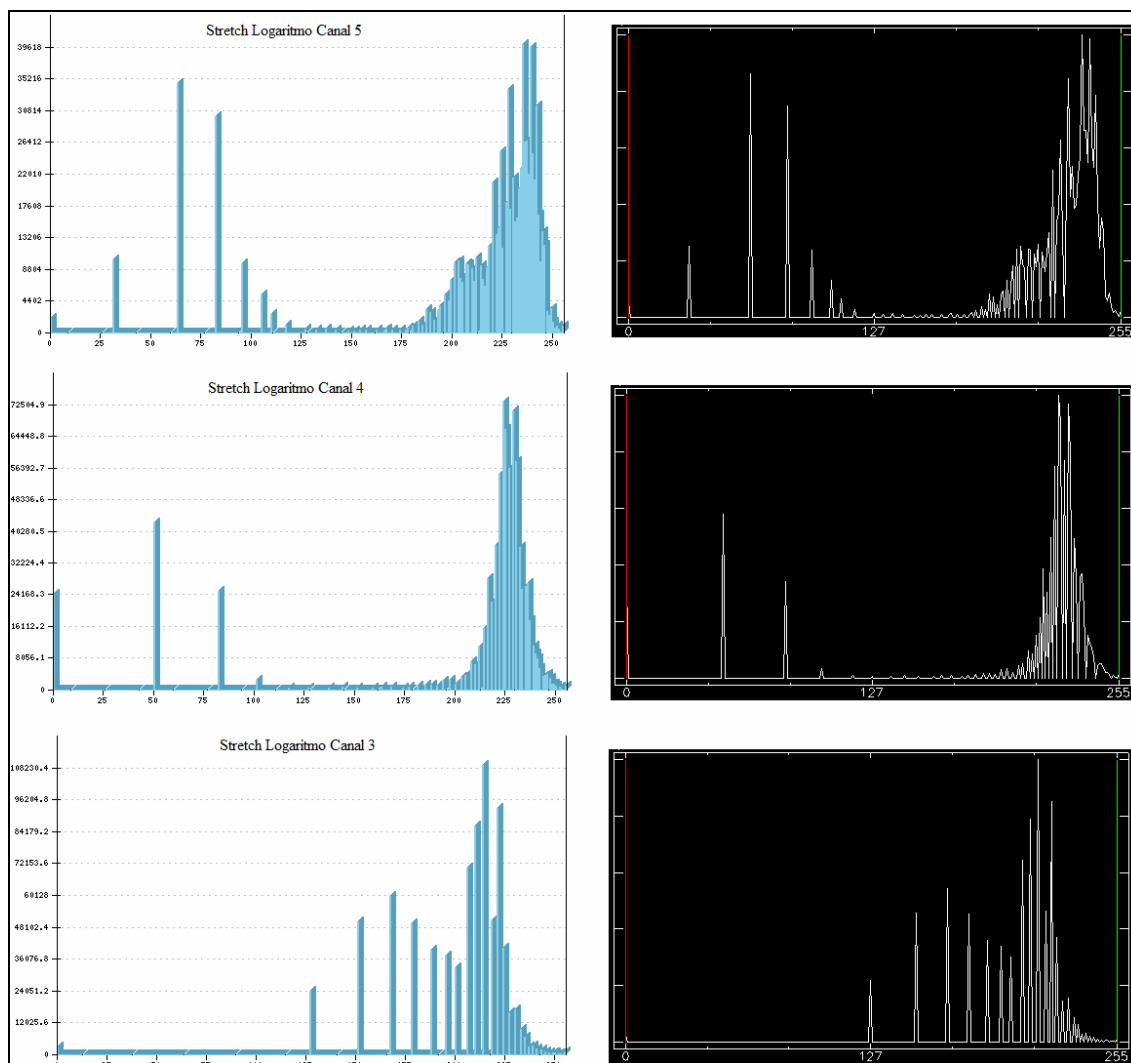


Figura 83 – Comparação entre os histogramas Stretch Logaritmo dos canais 5, 4 e 3: PDASR e SPRING 3.6.

4.1.8 Histograma Stretch Negativo

Para comparação do Stretch Negativo aplicado pela PDASR foi utilizado o software SPRING, na função “Imagem => Contraste”, com valores limites de contadores digitais de 50 a 150. Na Figura 84 são apresentados os histogramas dos três canais.

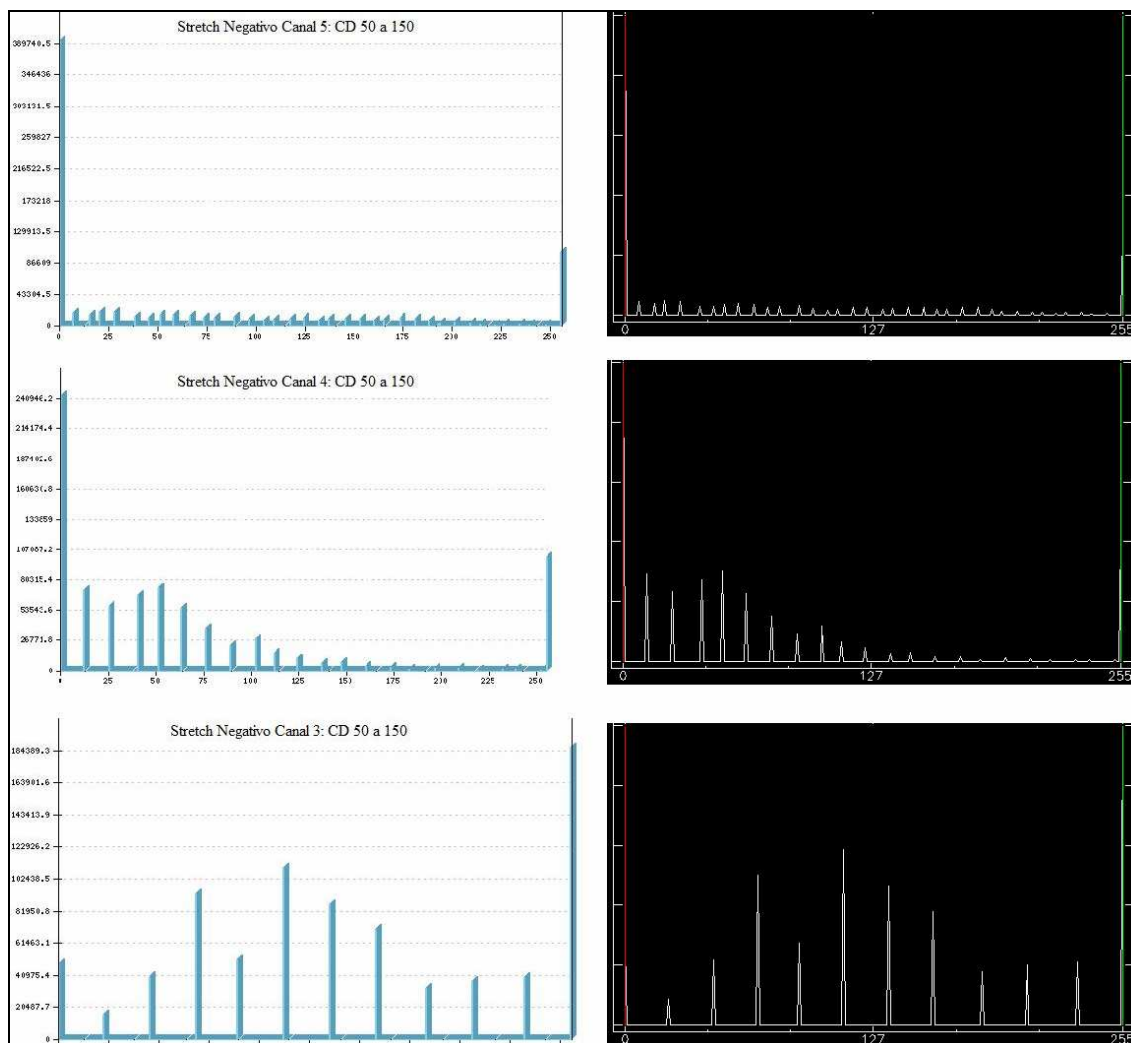


Figura 84 – Comparação entre os histogramas dos canais 5, 4 e 3: PDASR e SPRING 3.6, após a aplicação de Stretch Negativo com valores de CD entre 50 e 150.

4.2 Aplicação das técnicas de Manipulação de Histogramas em Imagens de SR

A seguir serão apresentados os resultados da *PDASR* na aplicação das técnicas de *Equalização*, *Stretch* e *Matching* diretamente nas imagens de sensoriamento remoto enviadas pelo usuário quando este faz uso da *PDASR*.

Como imagem de teste manteve-se a imagem do sensor LandSat 5 utilizado na Seção 4.1.

4.2.1 Equalização na Imagem

Na Figura 85 encontram-se as imagens geradas pela técnica de Equalização do histograma no software *SPRING* e na *PDASR*, respectivamente.

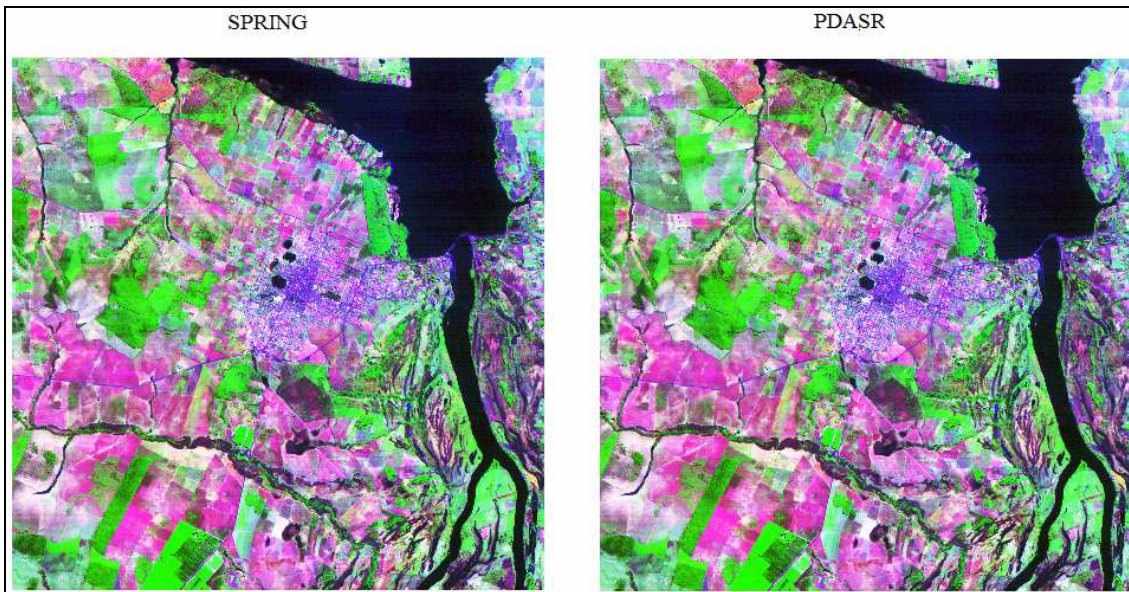


Figura 85 – Imagens resultantes da aplicação da Equalização do Histograma no software SPRING e na PDASR.

Afim de avaliar quantitativamente o resultado da técnica de Equalização do histograma pela PDASR foi feito um comparativo do valor de contador digital dos dez (10) primeiros pixels das imagens da Figura 85. Os valores são apresentados na Tabela 6, observando-se novamente uma variação máxima de 1 nível de cinza em alguns pixels.

Tabela 6 – Comparação dos CD's dos 10 primeiros pixel das imagens resultantes da Equalização do histograma: SPRING e PDASR.

Pixel		Canal 5	Canal 4	Canal 3
1	SPRING	82	224	115
	PDASR	82	224	115
2	SPRING	75	232	93
	PDASR	76	233	93
3	SPRING	78	238	93
	PDASR	78	238	93
4	SPRING	78	232	93
	PDASR	78	233	93
5	SPRING	82	232	115
	PDASR	82	233	115
6	SPRING	85	224	115
	PDASR	86	224	115
7	SPRING	82	248	82
	PDASR	82	249	83
8	SPRING	85	248	142
	PDASR	86	249	142
9	SPRING	234	196	251
	PDASR	234	197	251
10	SPRING	253	216	222
	PDASR	254	216	222

4.2.2 Stretch na Imagem

Nas figuras 86 à 90 são apresentadas as imagens resultantes da aplicação dos cinco tipos de Stretch disponíveis na PDASR comparados com resultados obtidos com os softwares ENVI ou SPRING.

No Stretch Linear e Negativo foi selecionado o intervalo de contadores digitais de 50 a 150.

Stretch Linear

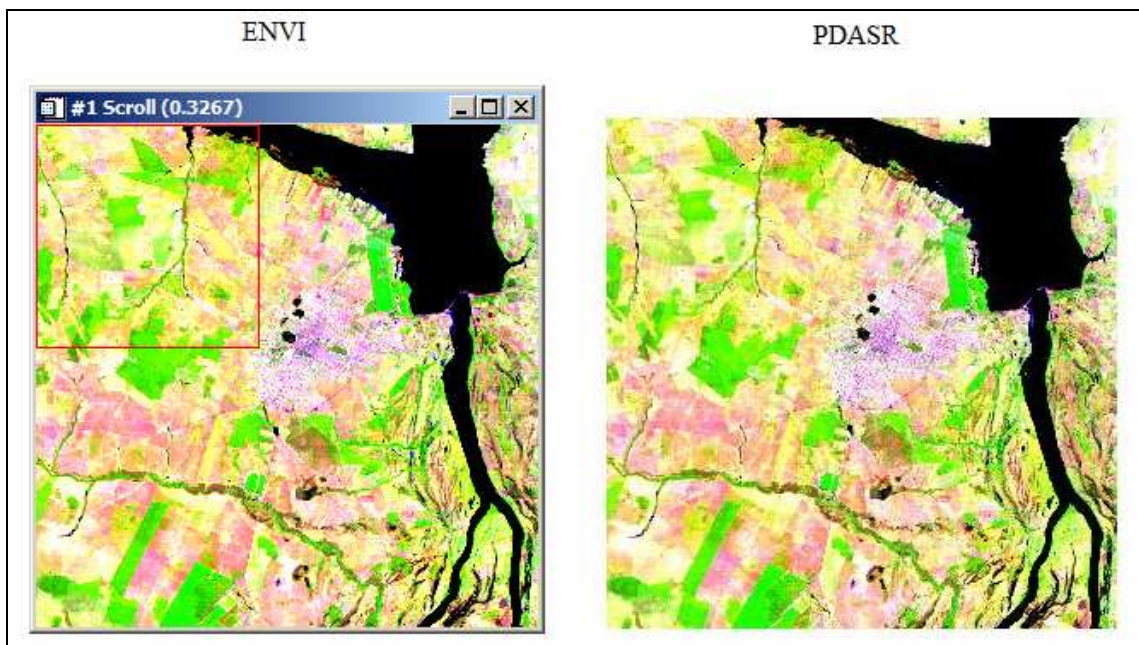


Figura 86 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Linear no software ENVI e na PDASR.

Stretch Raiz Quadrada

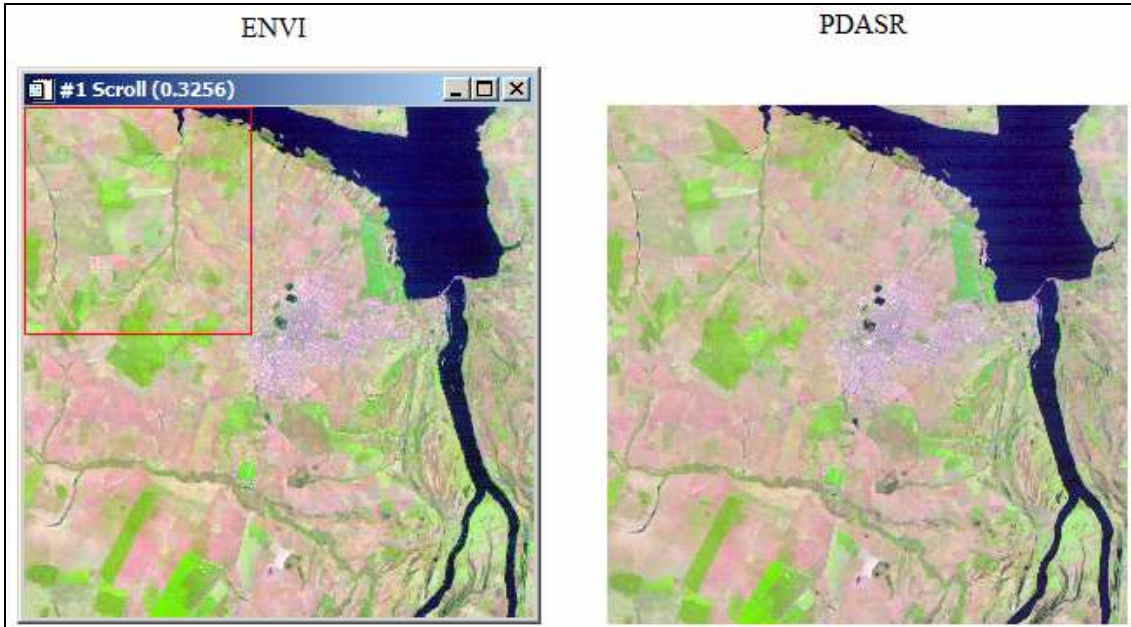


Figura 87 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Raiz Quadrada no software ENVI e na PDASR.

Stretch Quadrado

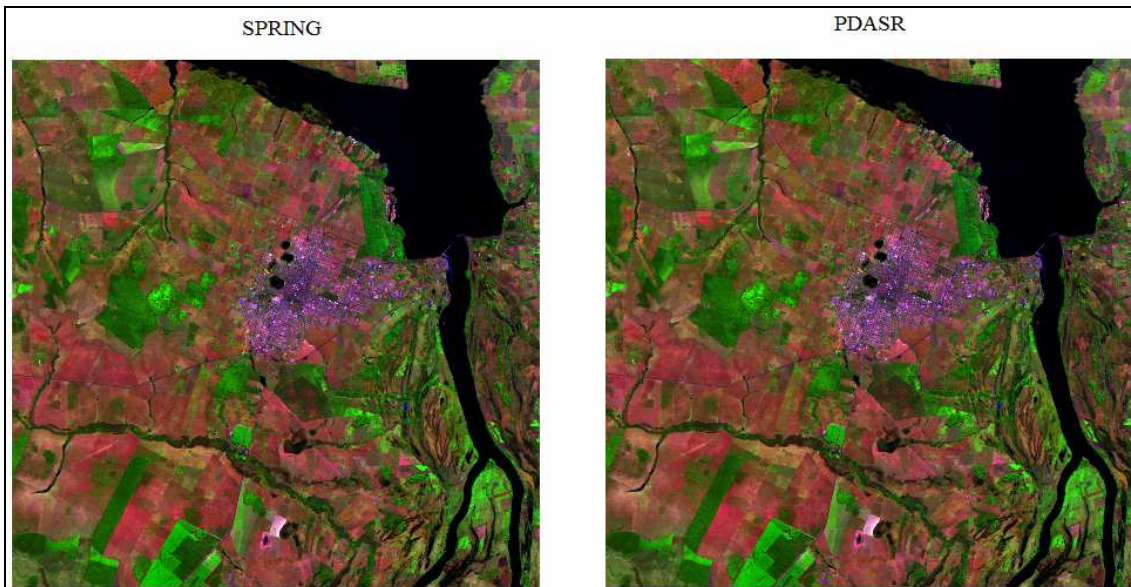


Figura 88 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Quadrado no software SPRING e na PDASR.

Stretch Logartimo

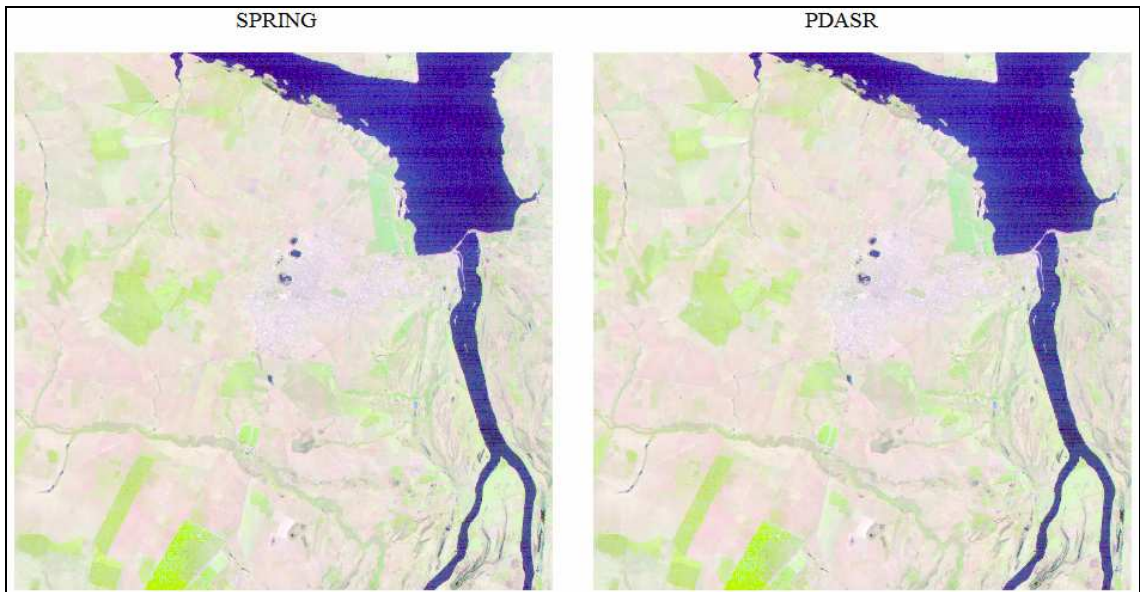


Figura 89 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Logaritmo no software SPRING e na PDASR.

Stretch Negativo

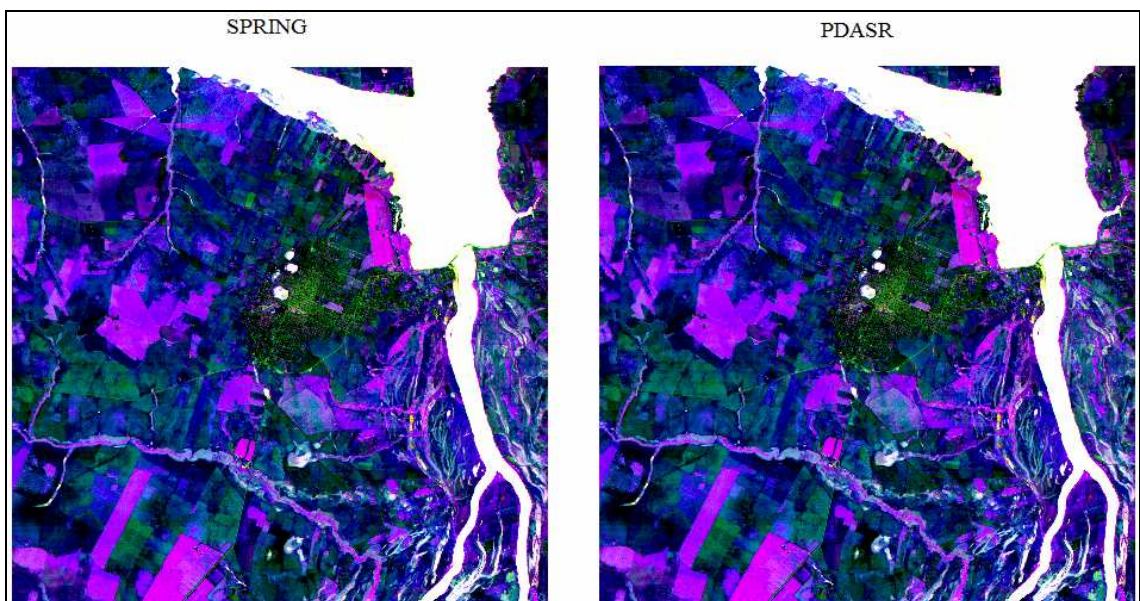


Figura 90 – Imagens resultantes da aplicação do Stretch Negativo (contadores digitais de 50 a 150) no software SPRING e na PDASR.

Para avaliação quantitativa foi escolhido o Stretch Linear apresentado na Figura 86. Na Tabela 7 é apresentado um comparativo entre os contadores digitais dos dez primeiros pixels das duas imagens (linha 1, da coluna 1 até 10), observando-se diferença em apenas 1 nível de cinza no pixel 2.

Diferenças desta ordem de grandeza são facilmente explicadas por arredondamentos durante as operações.

Tabela 7 – Comparação dos CD's dos 10 primeiros pixels das imagens resultantes do Stretch Linear: ENVI e PDASR.

Pixel		Canal 5	Canal 4	Canal 3
1	ENVI	166	255	97
	PDASR	166	255	97
2	ENVI	151	255	71
	PDASR	150	255	71
3	ENVI	158	255	71
	PDASR	158	255	71
4	ENVI	158	255	71
	PDASR	158	255	71
5	ENVI	166	255	97
	PDASR	166	255	97
6	ENVI	176	255	97
	PDASR	176	255	97
7	ENVI	166	255	48
	PDASR	166	255	48
8	ENVI	176	255	120
	PDASR	176	255	120
9	ENVI	255	255	255
	PDASR	255	255	255
10	ENVI	255	255	186
	PDASR	255	255	186

4.2.3 Matching entre duas Imagens

Para teste da função de *Matching* da PDASR, além da imagem LandSat 543 utilizada nos algoritmos anteriores, foi utilizada como referência uma imagem do sensor ETM+ LandSat 5 em composição colorida nas bandas 123, com resolução radiométrica de 8 bits, a qual abrange a área da Lagoa Mangueira (RS). A imagem (Figura 91) possui 1659 colunas e 1046 linhas em um arquivo no formato TIF com 5.208.274 bytes.



Figura 91 – Imagem ETM+ LandSat 5 da região Lagoa Mangueira (RS) utilizada como referência para aplicação do Matching.

O *Matching* utilizando as duas imagens citadas foi executado na PDASR e no ENVI 3.2, sendo as imagens resultantes apresentadas na Figura 92, onde verifica-se que são visualmente idênticas.

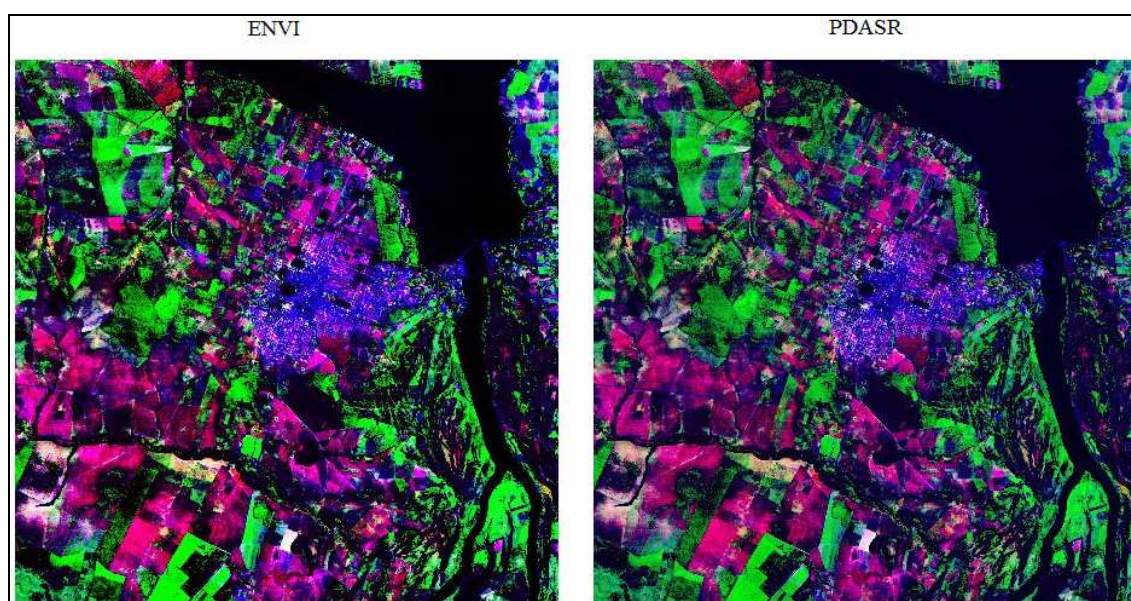


Figura 92 – Imagens resultantes da aplicação do Matching no software ENVI e na PDASR.

4.3 Transformação entre Sistema de Cores

Para teste dos algoritmos de transformação entre os espaços de cores RGB para HSV e vice-versa foi utilizada a mesma imagem do sensor ETM+ LandSat5, composição colorida das bandas 543, utilizada nos testes de manipulação do histograma.

4.3.1 Transformação RGB para HSV

Na transformação do espaço RGB para o HSV, a imagem resultante da PDASR não possui os atributos numéricos dos parâmetros HSV, pois estes valores são novamente convertidos para o intervalo de 0 a 255 a fim de formar a imagem de saída na tela do usuário.

Mesmo não possuindo diretamente os valores de HSV (H: 0° a 360°; S:0 a 1; V:0 a 1), a imagem resultante pode ser convertida novamente para o espaço RGB através da própria PDASR.

Na Figura 93 estão representadas as imagens resultantes da transformação RGB para HSV executadas pelo ENVI e PDASR respectivamente.

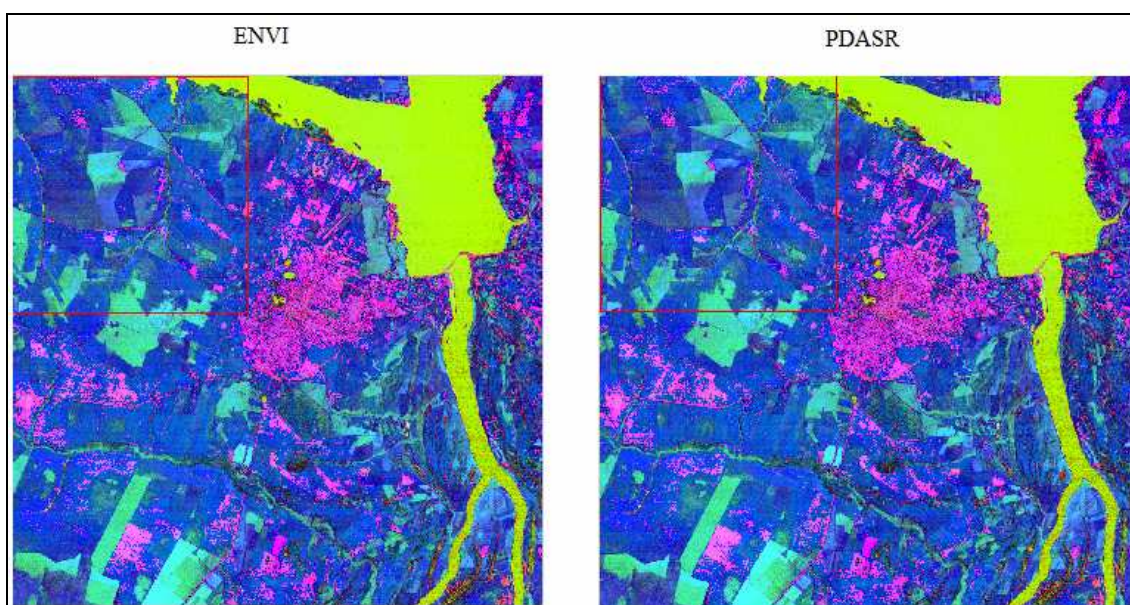


Figura 93 – Imagens resultantes da transformação RGB=>HSV no software ENVI e na PDASR.

4.3.2 Transformação HSV para RGB

A transformação de retorno ao espaço RGB tem seu resultados apresentado na Figura 94, onde, para melhor comparação visual, temos a imagem original lado a lado com as imagens RGB geradas pela PDASR e pelo ENVI.

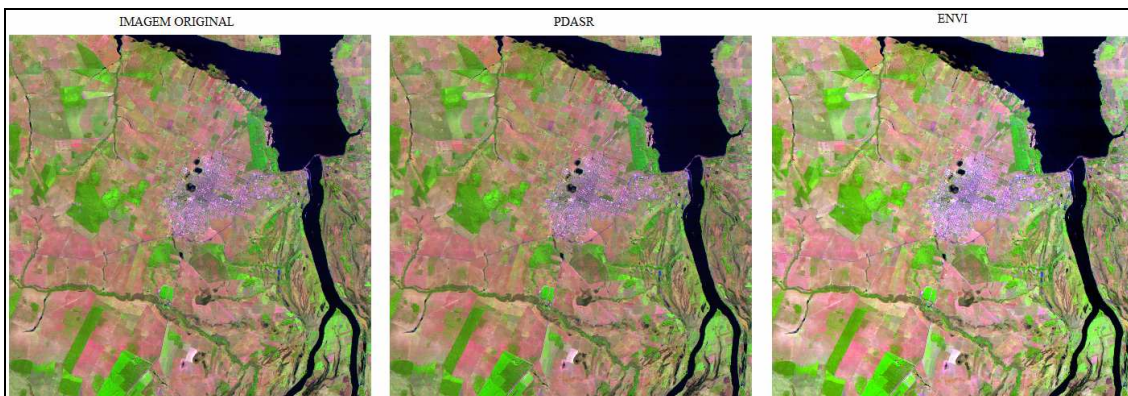


Figura 94 – Imagem original e imagens resultantes da transformação HSV=>RGB no software ENVI e na PDASR.

Na Tabela 8 são apresentados os valores de CD dos 10 primeiros (1 a 10) e dos 10 últimos (809.991 a 810.000) pixels do canal 5 das três imagens da Figura 94, onde verifica-se a correta aplicação da técnica implementada na PDASR.

Tabela 8 – Comparação dos contadores digitais de 20 pixels entre a imagem original e as imagens resultantes da transformação HSV=>RGB da PDASR e do ENVI (Canal 5).

Pixel	Original	PDASR	ENVI	Pixel	Original	PDASR	ENVI
1	115	115	115	809.991	154	154	154
2	109	108	108	809.992	144	144	144
3	112	112	112	809.993	115	115	115
4	112	113	111	809.994	112	112	112
5	115	115	114	809.995	115	115	115
6	119	119	119	809.996	76	76	76
7	115	114	115	809.997	115	115	114
8	119	118	118	809.998	177	177	177
9	196	196	196	809.999	150	150	150
10	226	226	226	810.000	159	159	159

4.4. Fusão de Imagens

Para testes das técnicas de Fusão de Imagens foram utilizados recortes de duas imagens do Sensor Orbital Quick Bird, as quais correspondem à mesma área no terreno, sendo estas representadas na Figura 95. A primeira imagem é uma composição colorida formada pelas bandas 321 e com resolução espacial de 2,4 m, enquanto a segunda corresponde à banda Pancromática do sensor, tendo resolução espacial de 0,61 m.

Obs: Na Figura 95 a composição colorida foi aumentada para permitir uma melhor comparação com a pancromática.

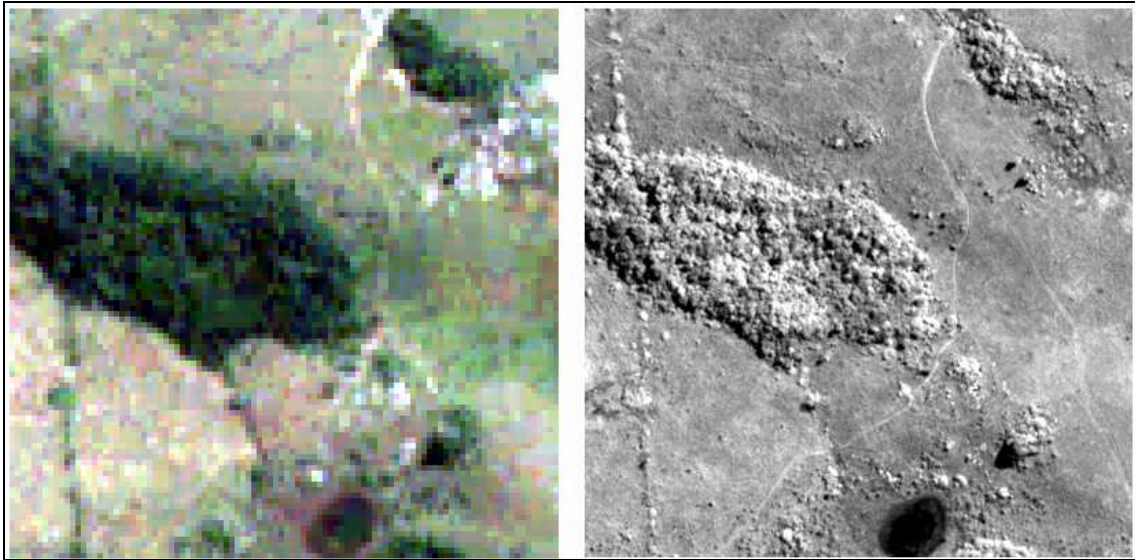


Figura 95 – Composição colorida 321 e pancromática do sensor Quick-Bird.

Aplicando-se a técnica de cor Normalizada disponível na PDASR obteve-se resultado que é comparado com a mesma operação realizada no Software ENVI 3.2 (Figura 96).

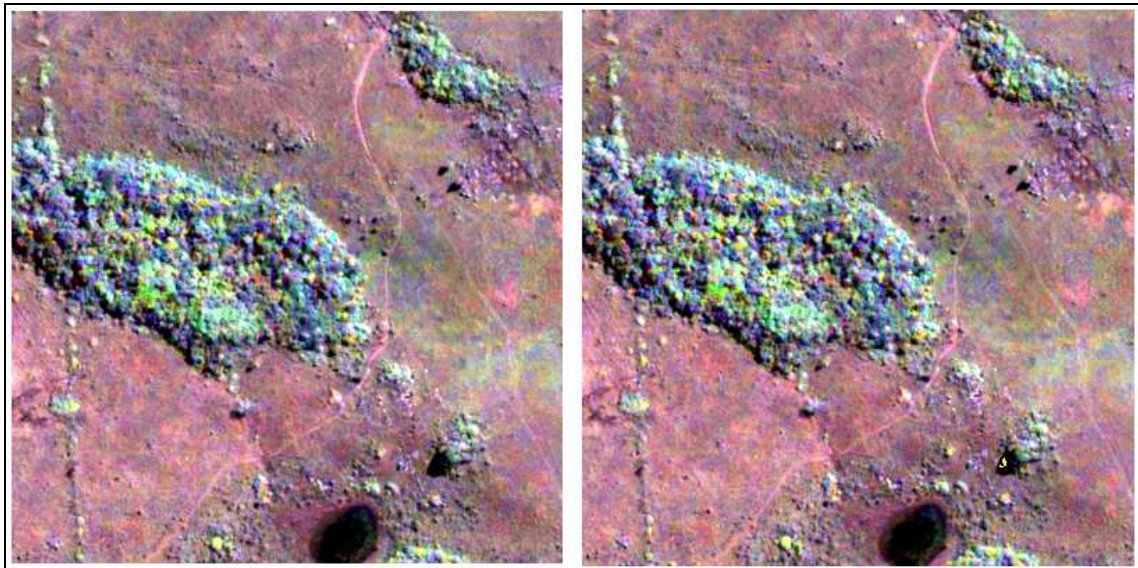


Figura 96 – Imagens resultantes da fusão por Cor Normalizada no software ENVI e na PDASR.

4.5 Filtragem Digital

Utilizando-se um recorte da imagem do sensor ETM+ LandSat 5 que mostra a área da Lagoa Mangueira-RS, foram aplicados os quatro tipos de filtros disponíveis da PDASR, comparando-se com os resultados obtidos no software ENVI 3.2.

Filtro de Suavização (Passa-Baixas)

Segue resultado da aplicação do filtro da Média Simples.

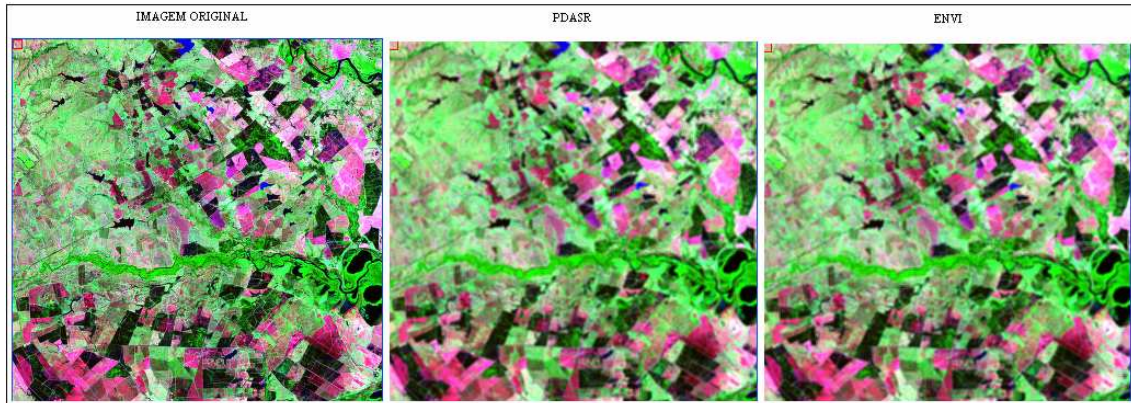


Figura 97 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de suavização na PDASR e no software ENVI.

Filtro de Aguçamento (Passa-Altas)

Imagens resultantes da aplicação do filtro de aguçamento de Laplace.



Figura 98 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de aguçamento na PDASR e no software ENVI.

Filtro de Detecção de Bordas

Imagens resultantes da aplicação do filtro de detecção de bordas de Aguçar.

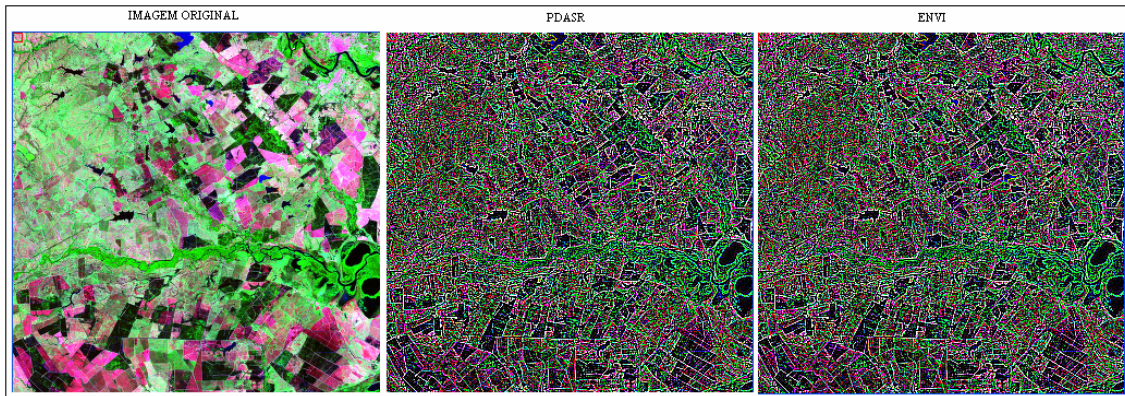


Figura 99 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro de detecção de bordas na PDASR e no software ENVI.

Filtros Direcionais

Imagens resultantes da aplicação de filtro direcional na direção leste.

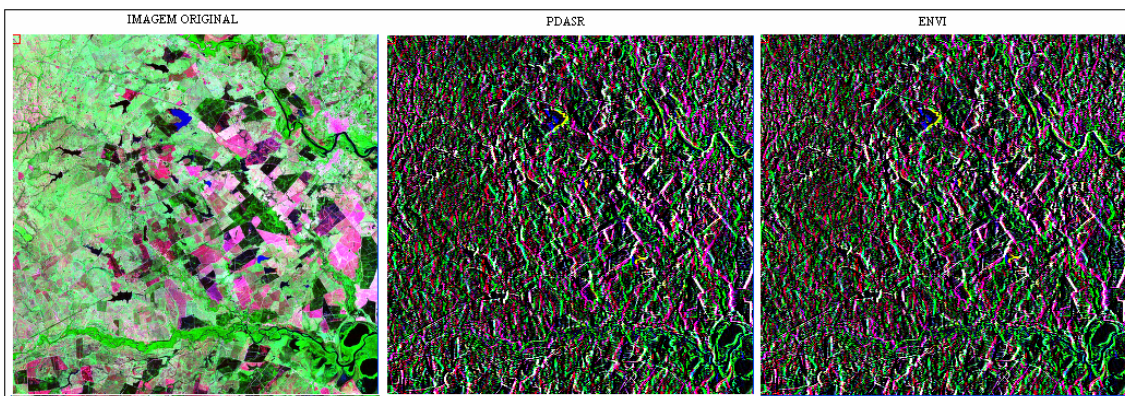


Figura 100 – Imagem original e imagens resultantes da aplicação de um filtro direcional na PDASR e no software ENVI.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas alternativas para o aprendizado à distância, como forma de complementação às disciplinas regulares e disponibilização de material para pesquisa em Sensoriamento Remoto. De maneira mais específica podemos apresentar as seguintes conclusões:

- 1) Com relação às linguagens C e PHP utilizadas em conjunto com a programação em HTML no desenvolvimento de páginas *web*, confirmou-se as vantagens dessa interação, apresentando ao usuário final um *website* atraente visualmente, com boa acessibilidade e com resultados confiáveis;
- 2) As ferramentas de processamento digital de imagens disponibilizadas atendem ao objetivo proposto, proporcionando a execução de operações que encontram-se documentadas no próprio *website*;
- 3) O entendimento detalhado dos algoritmos de processamento digital de imagens pode proporcionar o aperfeiçoamento deste tipo de ferramenta, bem como proporcionar a pesquisa de novos métodos;

5.2 Recomendações

A respeito das conclusões apresentadas cabem as seguintes recomendações:

- 1) Incentivo ao aperfeiçoamento das ferramentas de PDI disponibilizadas via *web*, bem como a implementação de algoritmos mais complexos, como forma de estudo e compreensão da teoria estudada em sala de aula e familiarização com linguagens de programação;

- 2) Novas técnicas de EAD (Ensino à Distância) devem ser testadas, visando-se aumento do público-alvo, através de métodos mais atrativos e interativos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. Bittencourt de. **Fotogrametria**. Ed. SBEE. Curitiba, Brasil: 1998.
- ANDRADE, Nilo Sérgio de Oliveira. **Qualidade Geométrica de Imagens JERS-1 (SAR) e RADARSAT (modos s2 e s3) em Ambiente de Floresta Tropical (Rondônia)**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos-SP, 2000. Disponível em <www.obt.inpe.br/pgsere/1999-Andrade%20N_S_O/paginadeacesso.htm>. Acesso em: 20 mar. 2007.
- BHON, Daniela. **Sites Dinâmicos com Dreamweaver, PHP & MySQL**. Editora Visual Books. Florianópolis - SC, 2004
- BRITO, Jorge. COELHO, Luiz. **Fotogrametria Digital** - 1ª Edição. IME - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.
- BRYNS, Leonardo Monteiro. **Cálculos Geodésicos – Aplicações On-line**. 2005. 89 p. Trabalho de Graduação em Engenharia Cartográfica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- CARVALHO, Adriano Andrei de. **Fundamentação Teórica para Processamento Digital de Imagens**. Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal de Lavras – Lavras – MG, 2003.
- CERQUEIRA, Eduardo O.; Poppi, Ronei; Kubota, Lauro T. **Utilização de Filtro de Transformada de Fourier para a Minimização de Ruídos em Sinais Analíticos**. Faculdade de Farmácia - Universidade de Franca - Franca – SP. 1999. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v23n5/3061.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2007.
- CROSTA, Álvaro Penteadó – **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Ed. Rev. –Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1993.

- D'ALGE, Júlio César Lima. **Geoprocessamento - Teoria e Aplicações – Parte I – Cap. 6 - Cartografia para Geoprocessamento**. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em 10 jan. 2007.
- ENVI - **Guia do ENVI em Português**. Sulsoft, 2000. Disponível em <http://www.sulsoft.com.br>. Acesso em 15 out. 2006.
- Figueiredo, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília – DF, 2005. Disponível em http://72.14.205.104/search?q=cache:r9r3jyI5bKsJ:www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf+divino+figueiredo,+conceitod+basicos+sensoriamento+remoto&hl=pt-BR&ct=clnk&cd=1&gl=br. Acesso em 10 fev. 2008.
- FLORENZANO, Tereza Gallotti. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FEINER, S.K.; HUGHES, J. F. **Computer graphics: principles and practice**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990. 1176p.
- GEMAEL, Camil. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1984. 319p.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1992. 716p.
- JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. New Jersey: Prentice-Hall. 1986. p 379.
- JENSEN, J. R.; JACKSON, M. W. **Introductory digital remote sensing image processing**. v. 3. modulo 1: The remote sensing process. Disponível em <http://www.cla.sc.edu/geog/rslab/>. Acesso em 22 ago. 2006.

- LILLESAND, T.M. ; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. . 2a Edition. New York. John Wiley& Sons. 2000. 721p. Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 10-12 January 2000.
- MELO, D. H. C. T. B. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo** / D. H. C. T. B. Melo. – São José dos Campos: INPE, 2002. 146p. – (INPE-9865-TDI/870).
- NAPOLEÃO, M.C.; LINGNAU, C.; ANTUNES, A. F. B. **A Influência dos Métodos de Reamostragem na Fusão de Imagens Landsat-5 TM e SPOT Pancromática**. Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2001. Disponível em http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/GeoColoq_2001/cbcg2053.pdf. Acesso em 09 dez. 2007.
- NIEDERAUER, J. **Desenvolvendo Websites com PHP**. Editora Novatec. São Paulo - SP, 2004.
- NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. Editora Edgar Blücher Ltda. São José dos Campos, 1989. 308p.
- PARADELLA, W. R. **Introdução ao processamento digital de imagens de sensores remotos aplicados a geologia**. São José dos Campos: INPE, 1990. 45p. (INPE-5023-RPE/616).
- PINHEIRO, Eduardo da Silva. **Avaliação de Imagens Quickbird na Análise Geográfica de um Setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado - INPE. São José dos Campos, 2003. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/pgsere/Pinheiro-E-S-2003/publicacao.pdf>>. Acesso em: 10 set 2007.
- PINHO, Carolina Moutinho Duque de; RENNÓ, Camilo Daleles; KUX, Hermann Johann Heinrich. **Avaliação de técnicas de fusão aplicadas à imagem Quickbird**.

- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - SP, 2005. Disponível em <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.20.14/doc/4225.pdf>>. Acesso em: 08 dez 2007.
- POLIDORIO, A. M.; FRANCO, C.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. T. **Correção Radiométrica de Imagens Multiespectrais CBERS e Landsat ETM usando Atributos de Reflectância e de Cor.** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 Abril 2005.
 - QUEIROZ, Corina Jará de. **Análise de Transformações Geométricas para o Georreferenciamento de Imagens do Satélite CBERS-I.** Dissertação de Mestrado. UFRGS – CEPSRM, 2003. Disponível em <<http://www.ufrgs.br/srm/DissertaçõesPos/A18.html>>. Acesso em 20 abr. 2006.
 - RAMOS, O. T. H. **Análise Comparativa entre os principais formatos de armazenamento de imagens.** Dissertação de Mestrado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2000.
 - RICHARDS, John A. **Remote sensing digital image analysis.** 2.ed. Springer-Verlag, Berlin, 1993. 281 p. Cap. 2: Error correction and registration of image data, p. 39-74.
 - RSI (Research Systems, Inc). **ENVI User's Guide.** ENVI Version 4.0 September, 2003.
 - SCHILDT, Herbert. **C, Completo e Total.** 3.ed. Makron Books do Brasil Editora, São Paulo, 1996. 720 p.
 - SCHOWENGERDT, R. A. **Spectral Transforms in: Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.** London: Academic Press, 1997. 522p.
 - SCHOWENGERDT, R. A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing.** University of Arizona. 1983. 249p.

- SILVA, Antônio Machado e. **Curso Processamento digital de imagens de satélite**. Centro de Eventos da PUCRS – de 07 a 12 de outubro de 2001. Porto Alegre – RS. Disponível em <www.cartografia.org.br>. Acesso em: 19 fev. 2007.
- SOUTO, Roberto Pinto. **Segmentação de imagem multiespectral utilizando-se o atributo matiz**. São José dos Campos: INPE, 2000. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/pgsere/Souto-R-P-2000/publicacao.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2006.
- SPRING: **Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling**. Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J. *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.
- TIFF - **Revision 6.0**. Adobe Developers Association, 1992. Disponível em <<http://www.adobe.com/Support/TechNotes.html>>. Acesso em: 24 mar. 2007.
- Uchoa, Helton Nogueira; Ferreira, Paulo Roberto. **Geoprocessamento com Software Livre**. 2004. Disponível em <<http://www.geolivres.org.br/modules/mydownloads/>>. Acesso em: 29 jan. 2008.
- VASCONCELOS, R. M. de. **GeoTiff – Uma abordagem Resumida do Formato**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro. 2002. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/geotiff.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2007.
- VRABEL, J. **Multispectral imagery band sharpening study**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v.62, n. 9, p. 1075-1083., 1996.
- Wikipédia, **A Enciclopédia Livre**. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Hsv>>. Acesso em: 10 jul. 2007.
- PHP. **Página oficial do PHP**. Disponível em <www.php.net> . Acesso em: 10 set. 2006.

- **CRIARWEB. Manuais e Recursos para Desenvolvimento Web.** Disponível em <<http://www.criarweb.com/php/>>. Acesso em: 05 set 2006.
- **INFOWESTER. Artigos sobre tecnologias relacionadas à computação.** Disponível em <<http://www.infowester.com/php.php>>. Acesso em: 05 set. 2006.