

MARIO JORGE SCHNEIDER

**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E A EVOLUÇÃO
TECNOLÓGICA NA RESOLUÇÃO EM SENSORIAMENTO
REMOTO: O CASO DA FUSÃO DE IMAGENS DE
DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-
Graduação em Informática, Setor de Ciências
Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Olga R. P. Bellon

CURITIBA

2001



Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Mestrado em Informática

PARECER

Nós, abaixo assinados, membros da Banca Examinadora da defesa de Dissertação de Mestrado em Informática do aluno *Mário Jorge Schneider*, avaliamos o trabalho intitulado "*Processamento Digital de Imagens e a Evolução Tecnológica na Resolução em Sensoriamento Remoto: O Caso da Fusão de Imagens de Diferentes Resoluções Especiais*", cuja defesa foi realizada no dia 12 de dezembro de 2001, às quatorze horas, no anfiteatro A do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná. Após a avaliação, decidimos pela aprovação do candidato.

Curitiba, 12 de dezembro de 2001.

Prof. Dra. Olga Regina Pereira Bellon
DINF/UFPR - Orientadora

Prof. Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli
Cartografia/UNESP

Prof. Dr. Hélio Pedrini
DINF/UFPR

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Ireni, filhos Marianna e Mateus e mãe Eneida, que compartilharam toda a dificuldade deste trabalho, sempre me apoiando nas horas que eu não pude estar ao seu lado por estar trabalhando e estudando;

Aos colegas Gilmar, Attilio e Aroldo, que participaram de várias maneiras escutando, fornecendo materiais, opinando e apoiando;

À minha orientadora Dra. Olga R. P. Bellon, que me escolheu como orientando, guiou todo o trabalho desde o primeiro dia, pressionando por resultados e apoiando nas dúvidas e decisões e escolhendo o meu Co-orientador;

Ao doutor Marcos Sunye, que me recebeu como aluno especial, permitindo o início do mestrado na Universidade Federal do Paraná;

Ao secretário José Carlos Pereira, que desde o primeiro dia, me orientou referente à vida acadêmica no mestrado;

Ao meu Co-orientador Hideo Araki que dedicou muitas horas, e a quem devo boa parte do entendimento e domínio dos conceitos necessários para a realização deste trabalho, sempre disponível e receptivo às minhas dúvidas e guiando e indicando o caminho a ser seguido;

A todas as pessoas que direta ou indiretamente auxiliaram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	2
SUMÁRIO.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS.....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1 - INTRODUÇÃO.....	8
1.1 JUSTIFICATIVA.....	8
1.2 OBJETIVO.....	10
1.3 CONTRIBUIÇÃO.....	12
1.4 COMPOSIÇÃO.....	13
2 – FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	15
2.1 FUNDAMENTOS.....	15
2.2 DEFINIÇÕES.....	17
Modelo de cores.....	17
Resolução.....	18
Fusão de imagens.....	22
3 – COMPARATIVO ENTRE OS SATÉLITES LANDSAT 7 E IKONOS.....	25
3.1 HISTÓRICO LANDSAT 7.....	25
3.2 HISTÓRICO IKONOS.....	25
4 – FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	29
4.1 FUNDAMENTOS.....	29
4.2 DEFINIÇÕES.....	29
Imagem digital.....	29
Pixel.....	30
Histograma.....	30
<i>Matching</i> de Histograma.....	30
Coeficiente de Correlação, Média e Matriz de covariância.....	32
CAPITULO 5 – FUSÃO DE IMAGENS DE DIFERENTES RESOLUÇÕES.....	34
5.1 Materiais.....	35
5.2 Métodos de Fusão.....	36
SUBSTITUIÇÃO.....	37
CPA (Análise das Componentes Principais).....	37
HSI (Matiz, Saturação e Intensidade).....	41
HSV (Matiz, Saturação e Valor).....	44
HPF (Filtro Passa-Alta).....	44
CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 7.....	46

CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE IKONOS.....	52
CAPÍTULO 8 – SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	61
8.1 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA.....	61
8.2 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS.....	69
CAPÍTULO 9 - AFERIÇÃO DOS RESULTADOS COM O CAMPO.....	71
CAPÍTULO 10 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXO A.....	83

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1: Espectro Eletromagnético.....	19
Figura 2. Princípios de fusão de imagens de diferentes resoluções.....	24
Figura 3: Imagens Multiespectrais(a), Pancromática(b), (LANDSAT 7) Originais de Curitiba, 2000.....	47
Figura 3(a) Fusão Landsat 7 pelo método da SUBSTITUIÇÃO.....	48
Figura 3(b) Fusão Landsat 7 pelo método HSV.....	48
Figura 3(c) Fusão Landsat 7 pelo método HSI.....	49
Figura 3(d) Fusão Landsat 7 pelo método CPA.....	49
Figura 3(e) Fusão Landsat 7 pelo método HPF.....	49
Tabela 2: Coeficiente de correlação entre imagens originais e as híbridas do LANDSAT 7 Curitiba, 2000.....	50
Figura 4: Imagens Multiespectrais (a), Pancromática(b) Original de Rio Negro, 2000.....	53
Figura 4(a) Fusão IKONOS pelo método da SUBSTITUIÇÃO.....	54
Figura 4(b) Fusão IKONOS pelo método HSV.....	56
Figura 4(c) Fusão IKONOS pelo método HSI.....	56
Figura 4(d) Fusão IKONOS pelo método CPA.....	57
Figura 4(e) Fusão IKONOS pelo método HPF.....	58

Figura 5(b) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida por SUBSTITUIÇÃO.....	64
Figura 5(c) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HSV.....	65
Figura 5(d) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HSI.	65
Figura 5(e) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida CPA.....	66
Figura 5(f) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HPF.....	68
Figura 6 – Segmentação de imagens de Rio Negro, pelo método K-means	70
Figura 7: Pontos verificados em campo da área em estudo.....	71
Figura 8: Fotos da área em estudo.....	73

LISTA DE TABELAS.

Tabela 1: Comparativo da Resolução espectral entre LANDSAT 7 e IKONOS..	26
Tabela 2: Comparativo entre imagens originais e as híbridas do LANDSAT 7...	50
Tabela 3: Comparativo entre as imagens originais e as híbridas do IKONOS....	59
Tabela 4: Legenda, quantidade de pixels para Classificação das imagens.....	63
Tabela 5: Comparativo entre as classes das imagens originais e as híbridas do IKONOS.....	67

RESUMO

As técnicas de fusão de imagens de satélite de diferentes resoluções espaciais visam à obtenção de uma imagem melhorada, com melhor definição dos detalhes espaciais, o que possibilita melhor interpretação visual. Idealmente, a imagem resultante deve manter as informações espectrais, permitindo a posterior segmentação e classificação com maior precisão.

Diferentes métodos de fusão têm sido propostos para efetuar a fusão de imagens de sensores de média resolução espacial como o Landsat TM (30 metros no modo multiespectral) e SPOT (10 metros no modo pancromático e 20 metros no modo multiespectral). O lançamento do satélite IKONOS 2 tornou possível a obtenção de imagens de alta resolução espacial (1 metro no modo pancromático) que contém informação espacial para várias aplicações de mapeamento e análise de áreas urbanas. Entretanto, a imagem multiespectral, que proporciona informação espectral importante para aplicações temáticas, é obtida com resolução espacial de 4 metros.

Este trabalho compara os resultados de cinco métodos tradicionais (Substituição, Transformação IHS, Transformação HSV, Substituição da Componente Principal e Filtragem Passa-Alta) na fusão das imagens multiespectral e pancromática do satélite IKONOS, avaliando a aplicabilidade desses métodos em imagens de alta resolução.

A análise dos resultados é feita com base em: 1) análise visual, 2) comparações estatísticas por meio do coeficiente de correlação e 3) na classificação da imagem híbrida. A área teste corresponde a uma região urbana, onde estão presentes diferentes tipos de cobertura, como edificações com diferentes tipos de telhas, vegetação arbórea e rasteira, água, solo exposto e ruas.

ABSTRACT

The techniques for fusion of satellite images of different spatial resolutions aims to enhance the image quality, for example, spatial details. This enhancement allows better visual interpretation. Ideally, the resulting image must keep the spectral resolution, leading to a more precise image segmentation and classification.

Many different fusion methods have been proposed to perform the image fusion for medium resolution images, for example, Landsat TM and SPOT. The IKONOS2 satellite became possible the obtaining of images of high space resolution (1 meter in the panchromatic mode) that contains spatial information for several mapping and urban area analysis applications. However, the multispectral image, that provides important spectral information for thematic applications, is obtained with spatial resolution of 4 meters.

This work compares the results of five traditional methods (Substitution, IHS Transform, HSV Transform, Substitution of the Principal Component and High-Pass Filtering) in the fusion of the panchromatic and multispectral images of the IKONOS satellite, evaluating the applicability of those methods in high resolution images.

The analysis of the results is done based in: 1) visual analysis, 2) comparisons of the correlation coefficient and, 3) classification of the hybrid image. The test area corresponds to an urban region with different land cover types, as constructions with different types of tiles, arboreal and low vegetation, water, exposed soil and streets.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A fusão de dados se refere aos processos de combinação de dados de sensoriamento remoto com os provenientes de outras fontes de informação espacial, e visa melhorar a compreensão de fenômenos específicos (DFC, 2001). A combinação de informações complementares possibilita um amplo campo de aplicações para o sensoriamento remoto. A fusão de imagens faz parte deste quadro mais geral de fusão de dados.

A fusão de imagens visa a geração de uma imagem a partir de imagens múltiplas (por exemplo, imagens multiespectrais, fotografias aéreas e imagens de radar) para a extração de informação de maior qualidade. Um caso particular é o da fusão de imagens com diferentes resoluções buscando a melhoria da resolução espacial e a manutenção da qualidade espectral. Imagens pancromáticas de alta resolução podem ser combinadas com imagens multiespectrais de menor resolução espacial mediante o uso de técnicas apropriadas. Deste modo, a resolução espectral pode ser preservada, enquanto a resolução espacial mais alta é incorporada de maneira a representar o conteúdo de informação das imagens com muito mais detalhes. Neste contexto, fusão de imagens significa uma técnica de processamento que combina dois conjuntos de imagens, formando uma imagem final melhorada.

Um caso especial é a fusão de bandas de um único sensor para realce de resolução (Pohl, 1999). A resolução espacial define o grau de detalhes que podem ser vistos na imagem e é importante para o uso da imagem para fins de mapeamento, medidas ou interpretação. Além disso, a resolução espacial proporciona informação importante para a classificação do tipo de cobertura do solo e para a interpretação, bem como para outros procedimentos de análise.

Entretanto, as imagens de sensores multiespectrais proporcionam a informação espectral essencial para aplicações temáticas como, por exemplo, o mapeamento do uso/ cobertura do solo.

O lançamento do novo satélite IKONOS 2¹ em final de 1999, com melhor resolução espacial, temporal e radiométrica, contra as existentes anteriores dos satélites LANDSAT 7² e SPOT³, permite a possibilidade de imageamento de até 1 metro de resolução espacial, num período de 1,5 dia e possibilitando a distinção e registro de 2048 níveis de cinza, alterando significativamente a quantidade e qualidade dos dados gerados como entradas para os sistemas de processamentos digitais de imagens.

Esta melhoria das resoluções pode alterar o comportamento do processamento de imagens, em especial, dos métodos de fusão, segmentação e classificação de imagens dos atuais softwares de processamento de imagens de satélites existentes no mercado sendo necessários estudos sobre os impactos que este evento gerou nos mesmos.

Imagens com uma grande quantidade de informações espectrais, podendo ser geradas num espaço de tempo muito curto, e com uma diferença espacial tão acentuada em relação às imagens de satélite existentes, podem invalidar os métodos e técnicas anteriormente utilizados para fusão, segmentação e classificação de imagens de satélite, ou aumentar a complexidade do processamento destas informações.

¹ <http://www.spaceimage.com>

² <http://landsat7.usgs.gov>

³ <http://www.spotimage.fr>

1.2 OBJETIVO

O principal interesse na fusão de imagens de diferentes resoluções é a criação de imagens compostas (híbridas) de interpretabilidade melhorada. As imagens devem ter o maior conteúdo de informação espacial possível e preservar a qualidade da informação espectral. (Cliché et al, 1985). Vários estudos foram realizados sobre a fusão da melhor resolução espacial das bandas pancromáticas, com a quantidade de informações espectrais das bandas multiespectrais, gerando imagens híbridas, visando uma melhor interpretação visual, ou uma melhor resolução espacial que possibilite melhor segmentação e classificação das imagens (Carper, 1990; Chavez et al, 1991; Cliché et al, 1985).

Alguns autores expressam a idéia de que o método de fusão não deve distorcer as características espectrais dos dados MS originais, de forma a assegurar que alvos que são espectralmente separáveis nos dados originais sejam também separáveis no conjunto de dados resultante (Chavez et al, 1991). Tais produtos permitem não apenas as delineações mais acuradas de feições, tomando-os mais úteis em várias aplicações, mas são também mais facilmente interpretáveis do que as assinaturas espectrais originais. Indo mais além, alguns autores até mesmo sugerem que os produtos resultantes com a máxima preservação da informação espectral podem idealmente simular imagens MS adquiridas com resoluções espaciais mais altas (Wald, 1997).

Facilitar a apresentação visual possibilita melhor interpretação visual, mesmo alterando parte das informações espectrais, pois apresenta uma melhor definição de imagens e detalhes, o que permite diferenciar os diversos elementos do terreno. Uma imagem híbrida, que possibilite a manutenção das informações espectrais, com uma melhor resolução espacial, permite uma posterior segmentação e classificação da imagem com maior precisão.

O objetivo deste estudo é verificar se os métodos de fusão de imagens existentes, tais como o Substituição, Transformação IHS, Transformação HSV, Substituição da Componente Principal e Filtragem Passa-Alta, amplamente utilizados nas imagens dos satélites LANDSAT 7 e SPOT, se aplicam às imagens do satélite IKONOS.

Os resultados da aplicação destes métodos serão analisados utilizando três métodos para sua comprovação.

Primeiro será utilizado o coeficiente de correlação entre as imagens originais e as imagens resultados das técnicas de fusão, indicando se houve, e qual o grau de alteração das informações espectrais ocorridas durante o processo de fusão;

Segundo, pela segmentação das imagens originais e híbridas, pelo método K-means, e a utilização de classificação supervisionada pelo método da máxima verosimilhança, visando verificar o comportamento da segmentação e classificação em relação às novas imagens;

E terceiro, pela análise visual das imagens originais e híbridas, resultados das imagens classificadas e segmentadas com comprovação dos mesmos com visitas a campo.

1.3 CONTRIBUIÇÃO

Diferentes métodos de fusão têm sido propostos e mutuamente comparados com relação à preservação de informação espectral (Chavez et al, 1991). Porém, em todos os casos, os resultados obtidos são dependentes da cena e, então, a qualidade com relação à preservação de informação espectral é imprevisível.

Para a validação dos resultados, tem sido enfatizado claramente que um método de fusão satisfatório têm que ser escolhidos com respeito à característica espectral das bandas multispectrais e a aplicação pretendida. Por exemplo para uma tarefa de classificação é importante preservar a informação espectral enquanto outras aplicações dependem de uma visualização nítida e detalhada da cena. Na prática, deve-se utilizar uma variedade de critérios aplicados a cenas com características diferentes (por exemplo, área urbana e de agricultura). Através do comparativo efetuado entre os processos de fusão de imagens, verificou-se se houve alterações nos resultados dos mesmos, devido à melhoria da resolução espacial e radiométrica dos novos sensores, bem como o mapeamento do comportamento de cada um dos métodos, confrontando os resultados com visitas a campo.

Estas imagens de alta resolução espacial permitem novos campos de aplicações como o cadastro urbano (Passos e Markus, 2001), assim como a alta resolução temporal, permite um melhor acompanhamento de problemas ambientais, como o vazamento de petróleo ou queimadas, que necessitam de imagens com alta resolução temporal, e também na identificação de feições com maior diferenciação entre as mesmas, como a utilização da melhor resolução radiométrica, para identificação geológica dos solos ou diferenciação das espécies na agricultura.

1.4 COMPOSIÇÃO

Este Trabalho é composto por 10 (Dez) capítulos cujas descrições são apresentadas a seguir:

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO: Apresenta o problema a ser solucionado, os objetivos do trabalho, e suas principais contribuições.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO: Apresenta os conceitos básicos de Sensoriamento Remoto, que nortearam a comparação evolutiva dos satélites e métodos em experimento.

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: Apresenta os conceitos básicos sobre processamento digital de imagens que serão analisados visando obter a carga adicional de processamento necessária.

CAPÍTULO 4 – COMPARATIVO ENTRE OS SATÉLITES LANDSAT 7 E IKONOS: Descrição técnica dos elementos componentes dos satélites, com os impactos que a modificação acarretará.

CAPÍTULO 5 – FUSÃO DE IMAGENS DE DIFERENTES RESOLUÇÕES: Apresentação dos conceitos de melhoria da resolução espacial de imagens multiespectrais de satélite pela fusão de imagens de satélites com resoluções espaciais melhores.

CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 7. Experimentos sobre fusão de imagens dos satélites LANDSAT 7, aplicando o método e comprovando a validade deste.

CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE DO IKONOS: Experimentos sobre fusão de imagens dos satélites IKONOS, aplicando o método e comprovando a validade deste.

CAPÍTULO 8 – SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO: Apresentação básica dos conceitos de segmentação e classificação que serão utilizados para quantificação dos resultados comparativos. Experimentos sobre segmentação e classificação com produtos híbridos do satélite IKONOS

CAPÍTULO 9 - AFERIÇÃO DOS RESULTADOS COM O CAMPO: Verificação dos elementos visuais, e classificados contra os objetos reais em campo, para comprovação da eficácia dos métodos.

CAPÍTULO 10 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO. Considerações finais e conclusões sobre o trabalho realizado.

2 – FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

2.1 FUNDAMENTOS

Neste capítulo, trabalharemos os fundamentos do Sensoriamento Remoto, indicando o conhecimento necessário ao entendimento dos processos adiante desenvolvidos.

Além da luz visível, existem radiações invisíveis para os olhos, como por exemplo, raios cósmicos, raios gama, raios x radiações infravermelhas e ultravioletas, microondas, ondas de rádio e Tv. Sempre avançando em seus experimentos os cientistas conseguiram provar que a onda de luz era uma onda eletromagnética, mostrando que a luz visível é apenas uma das muitas diferentes espécies de ondas eletromagnéticas.

Sensoriamento Remoto é a ciência através da qual, transformamos dados de radiância, (comportamento espectral dos alvos) em informações sobre os objetos que a compõem (Novo, 1993).

Sensoriamento Remoto é a ciência de observação à distância. Isto contrasta com o sensoriamento *in situ*, onde objetos são medidos e observados no local onde ocorrem. Em outras palavras, o Sensoriamento Remoto está relacionado à ausência de contato físico entre o sensor e o alvo. (Oliveira, 1999),

Para ampliar a capacidade de visão humana da Terra, inicialmente foram construídas câmeras transportadas por balões de ar quente. Hoje, possuímos sensores em vez de câmeras e os balões foram substituídos por aeronaves e satélites, que possibilitam a constante monitoração da Terra é, que coletam informações sobre as condições da superfície terrestre. Usuários de Sensoriamento Remoto podem escolher entre uma gama muito grande de opções de dados registrados por estes sensores.

A vantagem do Sensoriamento Remoto, é que facilita um trabalho que poderia ser obtido de outra forma, com idas a campo para verificação local do objeto de estudo, porém de maneira árdua, com altos custos. Desta forma, os dados obtidos pelos satélites podem ser usados como uma fonte primária de informação, ou como um complemento para outros tipos de informações como mapas e dados georeferenciados (conjunto de dados que possuem localização determinada em algum lugar da superfície terrestre).

Como exemplo, são citados os monitoramentos de queimadas na floresta amazônica, que seria um processo praticamente impossível de ser realizado pessoalmente, ou com um alto custo, através de sensores aerotransportados e que com a utilização de imagens em diversos espaços de tempo, possibilitam um acompanhamento real do crescimento do desmatamento e queimadas nesta área.

2.2 DEFINIÇÕES

Modelo de cores

O propósito de um modelo de cores é facilitar a especificação das cores em alguma forma padrão e de aceitação geral. Essencialmente, um modelo de cor é a especificação de um sistema de coordenadas tridimensionais e um subespaço dentro deste sistema onde cada cor é representada de um ponto. Os modelos mais usados na prática são o RGB (Red, Green e Blue), o HSI (matiz, saturação e intensidade) e o HSV (Matiz, saturação e valor). (Gonzalez, 2000).

No modelo RGB de cores, representado por um cubo, no qual os valores red, green e blue estão nos 3 cantos, ciano, magenta e amarelo estão nos outros três cantos, preto está na origem e o branco está no canto mais distante da origem. Neste modelo, a escala de cinza estende-se do preto até o branco, ao longo da linha juntando estes dois pontos. (Gonzalez, 2000).

No modelo HSI de cores, representado por uma pirâmide de três lados, onde qualquer ponto na superfície desta estrutura representa uma cor puramente saturada. O Matiz dessa cor é determinado por seu ângulo com respeito ao eixo vermelho e sua intensidade por sua distância, perpendicular do ponto preto. (Gonzalez, 2000).

Matiz: é um atributo associado com o comprimento de onda dominante em uma mistura de ondas de luz. Assim o matiz representa a cor dominante como percebida por um observador.

Intensidade: Intensidade de luz ou quantidade ou níveis de cinza.

Saturação: Grau em que a cor não está diluída pelo branco, sendo proporcional à distância do ponto ao centro do triângulo de cores. Quanto mais distante o ponto do centro do triângulo, mais saturada a cor.

Intensidade: Medida com respeito a uma linha perpendicular ao triângulo, passando através do seu centro. Abaixo tendem ao escuro, até o preto e acima tendem ao claro, até o branco. (Gonzalez, 2000).

Resolução

Existem quatro características que isoladamente ou em conjunto podem levar à escolha do tipo de dados registrados pelos sensores, que atenderão à necessidade do usuário:

1. Resolução Espectral
2. Resolução Espacial
3. Resolução Temporal
4. Resolução Radiométrica.

O entendimento de cada um destes termos auxilia na escolha dos produtos, para atender necessidades específicas e a escolha das plataformas existentes como fonte de imagens.

Resolução Espectral

Habilidade que o sensor possui de registrar uma quantidade de informações refletidas pela superfície terrestre, com informações de uma estreita faixa do espectro eletromagnético (Figura 1). O Olho humano é capaz de detectar somente uma faixa deste espectro, representada pela região denominada visível, que abrange o vermelho, verde e azul (RGB – Red, Green e Blue do inglês).

Em contrapartida, os sensores construídos para o Sensoriamento Remoto, não possuem esta limitação, sendo capazes de detectar e medir a luz e energia de qualquer faixa do espectro eletromagnético, incluindo raios ultravioletas, infravermelhos, termais e microondas.(Gonzalez, 2000).

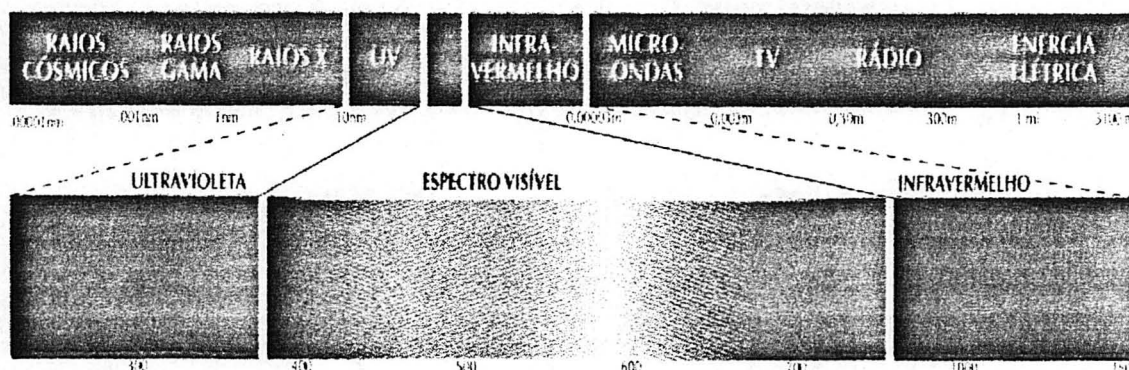


Figura 1: Espectro Eletromagnético (Gonzalez, 2000).

Resolução Espacial

A resolução espacial, também conhecida como tamanho do pixel e o equivalente em metros no terreno.(Richards, 1993).

Por exemplo, a resolução espacial do satélite LANDSAT 7, SPOT e IKONOS, são respectivamente 30, 20 e 4 Metros em bandas multiespectrais e 15, 10 e 1 metro em bandas pancromáticas.

Resolução Temporal

Os satélites orbitam em torno da terra, ou são geoestacionários (acompanham a terra na mesma velocidade), e a resolução temporal, é o intervalo de tempo que um satélite leva obter uma imagem de uma mesma região do terreno. Nos satélites geoestacionários a resolução temporal é grande,

e nos com órbitas polares, dependem de uma série de fatores, como direção da órbita, altitude, e podem levar de 1,5 dia no satélite IKONOS e 26 dias no satélite LANDSAT.

Satélites com órbitas polares variam em altitude entre 700 a 1500 Km, enquanto que os Geoestacionários orbitam na faixa de 36.000 Km, geralmente sobre a linha do Equador.

Resolução Radiométrica.

Quantidade de níveis de cinza que um sensor consegue registrar, representado por uma potência do número 2. (Gonzalez, 2000). Assim, o LANDSAT 7 e SPOT, possuem uma resolução radiométrica de $2^{8\text{bits}}$ o que representa 256 níveis de cinza, e o IKONOS, $2^{11\text{bits}}$ representando 2048 diferentes níveis de cinza.

Sensores

Sensores são equipamentos capazes de coletar energia refletida por um objeto, e convertê-la em sinal passível de ser registrado. Podem ser de duas categorias:

Multiespectrais

São projetados para registrar somente faixas do espectro eletromagnético previamente determinadas, podendo ser na região do visível, infra-vermelho próximo e infra-vermelho médio. Uma câmara fotográfica digital é construída para que cada sensor registre informações da região do verde, vermelho e azul. Assim, quando projetamos três bandas no canhão de cores RGB e compõe-se uma imagem formada por elementos captados especificamente para cada uma das cores, ou ainda, podemos inverter ou alternar a projeção no canhão de cores, para ressaltar determinados tipos de objetos.

A quantidade que os detectores dos sensores multiespectrais possuem, são em número menor do que os detectores dos sensores pancromáticos, e necessitam um intervalo de tempo de exposição maior, o que diminui a resolução espacial, porém como são construídos para captar somente uma região específica da faixa do espectro eletromagnético possuem uma maior resolução espectral.

Hoje em dia, porém, os sensores são construídos para captar informações além da região do visível, atingindo regiões do infravermelho, ultravioleta, microondas e outras classes do espectro eletromagnético. Deste modo as imagens de sensores multiespectrais proporcionam a informação espectral essencial para aplicações temáticas como, por exemplo, o mapeamento do uso/ cobertura do solo.

Pancromáticos

O termo "pancromático" significa "todas as cores", e nos sensores mais antigos era câmeras fotográficas que utilizavam filmes em preto-e-branco.

Hoje estes sensores captam a faixas do espectro eletromagnético, da região do visível até o infravermelho próximo. Os sensores possuem uma quantidade de detectores maiores para imagear a mesma área, possuindo desta maneira, uma maior resolução espacial. Como exemplo, os sensores do satélite Landsat possuem 3.000 detectores no modo multiespectral, e 6.000 no pancromático.

Os dados da imagem pancromática interessam quando a informação espacial é mais importante que a informação espectral. Estas imagens apresentam mais detalhes espaciais enquanto que as imagens do sensor multiespectral fortalecem a facilidade de diferenciação dos vários elementos de cobertura do solo. (Richard, 1993).

Fusão de imagens

Fusão significa uma técnica de processamento que combina dois conjuntos de imagens, de dois ou mais sensores, formando uma imagem final melhorada (Yocky, 1996). Assim, combinamos as vantagens da melhor resolução espacial dos sensores pancromáticos, com a melhor resolução espectral dos sensores multiespectrais, obtendo um conjunto final, com uma melhor resolução espacial, sendo desejável, manter a melhor resolução espectral das imagens multiespectrais.

Na figura 2, verifica-se um esquema que identifica todos os passos necessários à realização de qualquer processo de fusão de imagens idealizado por (Guarguet-Duport, 1996), ao qual, introduzimos os métodos aplicados neste trabalho. O processo parte de um conjunto de bandas multiespectrais (Banda 1, Banda 2, Banda 3). Uma das bandas originais pode ser substituída pela banda pancromática (PAN); ou uma das bandas geradas por um processo de transformação (IHS, HSV ou PCA) pode ser substituída pela banda pancromática; ou, ainda, a informação de alta frequência espacial presente na banda pancromática pode ser adicionada a cada banda espectral. Para o caso da fusão baseada em transformação, é efetuada uma transformada inversa para gerar as bandas híbridas (Banda 1 híbrida, Banda 2 híbrida, Banda 3 híbrida).

Ressaltamos observar a necessidade da reamostragem das bandas multiespectrais para que os pixels sejam compatibilizados com a imagem PAN, permitindo o registro das imagens. Faz-se necessário também, o *matching* do histograma, entre a banda a ser substituída e a banda pancromática, para refletir o comportamento radiométrico entre as mesmas no processo de fusão (Munehika, 1996).

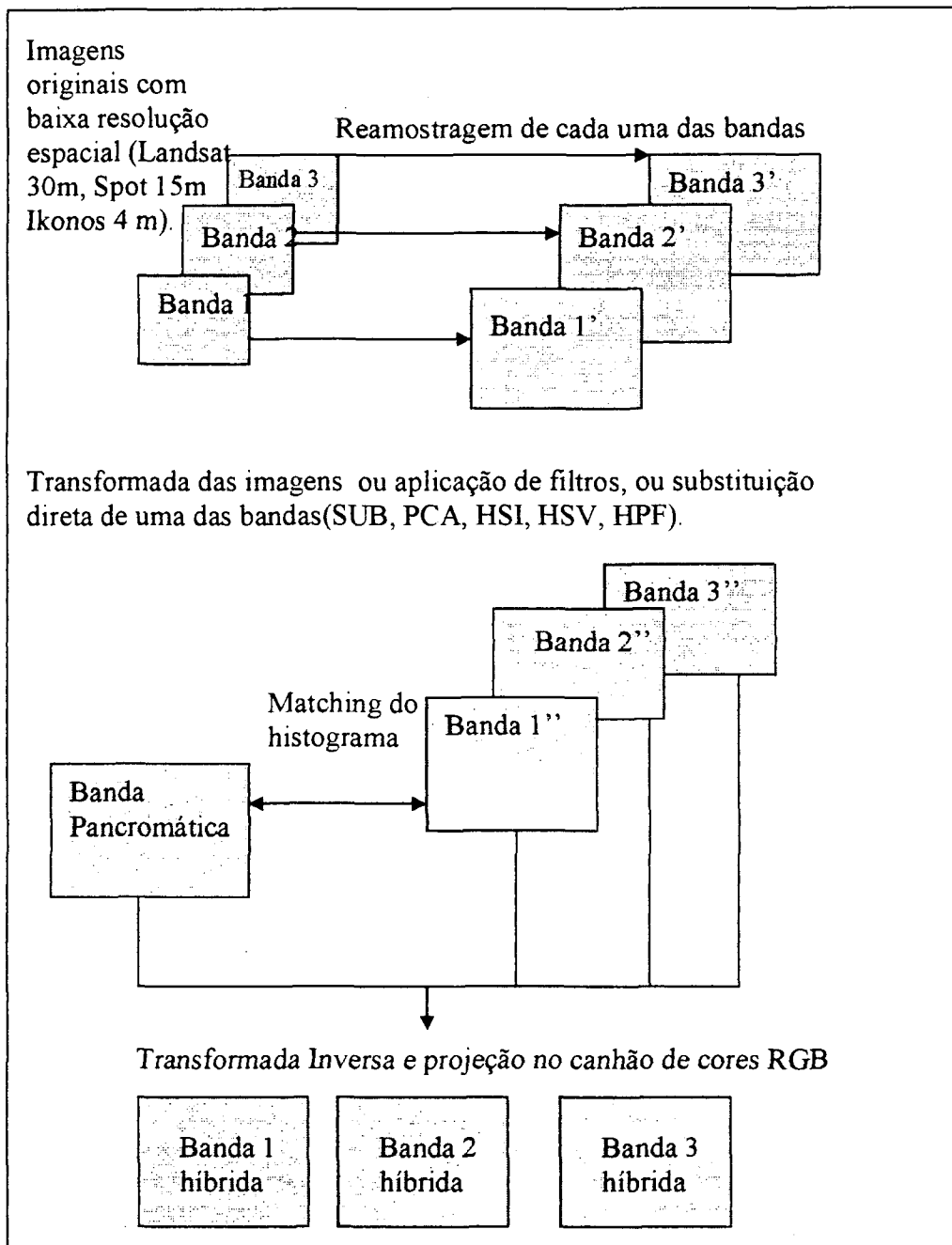


Figura 2. Princípios de fusão de imagens de diferentes resoluções. (adaptado de Guarguet-Duport et. Al, 1996).

Assim, concluí-se o estudo sobre Sensoriamento Remoto, definindo os termos necessários neste estudo, como resoluções espaciais, espectrais, radiométrica, temporal, sensores multiespectrais e pancromáticos e fusão de imagens.

3 – COMPARATIVO ENTRE OS SATÉLITES LANDSAT 7 E IKONOS

Neste comparativo, será mostrado um breve histórico, bem como serão indicadas as diferenças baseadas na resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica entre os dois satélites, e quais implicações estas alterações geram para o processamento digital de imagens.

3.1 HISTÓRICO LANDSAT 7.

A primeira geração de satélites LANDSAT, originalmente chamado de ERTS (Earth Resources Technology Satellite) foi desenvolvida e lançada pela NASA entre Julho de 1972 e março de 1978. Uma segunda geração, denominada Landsat 4 e 5 foi lançada em Julho de 1982 e março de 1984.

A terceira geração, denominada LANDSAT 7 visa dar continuidade a mais de 26 anos de registro de imagens sobre a superfície terrestre.

O LANDSAT 7 foi lançado às 11:36 horas do dia 15 de Abril de 1999 na base da força aérea Americana de Vandenberg na Califórnia, num veículo de lançamento Delta-II.

Consiste de um mapeador temático melhorado (Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+). O ETM+ é um scanner radiométrico de 8 bandas.

3.2 HISTÓRICO IKONOS.

O IKONOS II é o primeiro satélite privado com qualidade de imagem próxima à dos satélites espões militares. Lançado às 2:22 hs. do dia 24 de setembro de 1999, da mesma base militar de Vandenberg que o Landsat 7. O seu antecessor (Ikonos I) falhou no lançamento em Abril do mesmo ano.

Resolução espacial.

A resolução espacial de 1 metro no sensor pancromático e de 4 metros nos sensores multiespectrais do IKONOS, contra 15 metros no sensor pancromático e 30 metros nos sensores multiespectrais do LANDSAT 7.

Esta evolução tecnológica, apesar de ser possível sua aplicação ao satélite LANDSAT 7, foi mantida a resolução anterior, visando manter a compatibilidade de suas informações com o passado já registrado.

Resolução espectral.

A resolução espectral do IKONOS, segundo tabela abaixo(Tabela 1), mostra que ambos os satélites são compatíveis da mesma faixa de imageamento quer na região do visível e infravermelho próximo(0.45 a 0.90), quer na banda pancromática (0.45 a 0.90).

Resolução espectral	LANDSAT 7	IKONOS
	Pancromática	Pancromática
	0.52 to 0.90	0.45 - 0.90 micron
	Multispectral	Multispectral
	Banda 1 Blue 0.45 a 0.515	Banda 1: Blue 0.45 a 0.52
	Banda 2 Green 0.525 a 0.605	Banda 2: Green 0.52 a 0.60
	Banda 3 Red 0.63 a 0.690	Banda 3: Red 0.63 a 0.69
	Banda 4 Near IR 0.75 a 0.90	Banda 4: Near IR 0.76 a 0.90
	Banda 5 1.55 a 1.75	
	Banda 6 10.40 a 12.5	
	Banda 7 2.09 a 2.35	

Tabela 1: Comparativo da Resolução espectral entre LANDSAT 7⁴ e IKONOS⁵

⁴ <http://landsat7.usgs.gov>

⁵ <http://www.spaceimage.com>

Resolução temporal.

O satélite LANDSAT 7 possui uma resolução temporal de 16 dias, enquanto que o IKONOS possui resolução de 2,9 dias na resolução de 1 metro, e 1,5 dia numa resolução de 4 metros. Estes valores são para alvos na região de 40° de latitude. O tempo de revisita pode ser mais freqüente nas latitudes maiores, e menos freqüentes nas mais próximas do Equador⁶.

Resolução Radiométrica.

A variação de $2^{8\text{bits}}$ (255 níveis de cinza) para $2^{11\text{bits}}$ (2048 níveis de cinza) do LANDSAT 7 para o IKONOS permite capturar uma variação da reflectância muito mais apurada, e elementos que anteriormente apresentavam o mesmo tom de cinza, podem ser diferenciados com os novos sensores. Esta vantagem, porém, gera muito mais informações, sendo necessário processamento computacional adicional.

Conclusões sobre as diferenças entre os satélites.

Percebe-se claramente, que a quantidade de informações geradas pelo novo sensor, implicará num trabalho extra de processamento. A cada 1,5 dias contra 16 dias teremos possibilidade de imagens de uma mesma região, sendo necessário um nível de processamento mais freqüente, com um maior volume de dados, pois uma imagem do LANDSAT 7 de 1024 x 1024 pixels, é armazenada em 8MB, enquanto que a mesma imagem do IKONOS ocupa 11 MB, ou seja, um acréscimo de 37% somente no armazenamento, e a possibilidade de geração de novo conjunto de imagens, 10 vezes mais rápido, implicam na necessidade de aumento da capacidade de processamento e formas de armazenamento das imagens.

⁶ <http://www.spaceimage.com>

Outro fator importante refere-se ao tamanho da cena, que para o LANDSAT representa uma área do terreno de 185x185 Km, enquanto que para o IKONOS, 11x11 Km, onde necessitamos aproximadamente 256 cenas do IKONOS para representar a mesma área do LANDSAT.

Assim, verifica-se que para tratar todas as imagens referentes a 16 dias do satélite LANDSAT 7 (resolução temporal), necessita-se de um processamento de aproximadamente 480 MB de dados. Para processar todas as imagens do satélite IKONOS neste mesmo período, seriam necessários dez processamentos 122.880 MB, gerando aproximadamente 1200 GB de dados a serem processados.

Este aumento significativo das informações a serem processadas, bem como o aumento da resolução espacial que define melhor os detalhes das imagens, deve ser levado em consideração na escolha do tipo de processamento e da necessidade ou não desta nova tecnologia. Para trabalhos relacionados a tendências de crescimento urbano, as imagens do LANDSAT são mais indicadas, enquanto que o mapeamento urbano ou detalhes em relação às casas e arruamentos, pode-se pensar na utilização das imagens do IKONOS.

Outro fator a ser considerado, é que esta resolução temporal do IKONOS, depende de programação do satélite e deve ser solicitada a monitoração específica à empresa que o administra, para que a mesma programe o satélite para realizar esta tarefa. O imageamento não é constante de toda a área de abrangência do satélite. Outro fator, é que uma cena completa do mesmo, está na ordem de US\$10.000 e o acompanhamento de um evento de curta duração, pode realmente se tornar caro.

4 – FUNDAMENTOS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

4.1 FUNDAMENTOS

Neste capítulo, revisaremos os fundamentos do processamento digital de imagens, necessários para o entendimento do presente estudo.

O interesse em métodos de processamento de imagens digitais decorre de duas áreas principais de aplicação (Gonzalez, 2000).

- Melhoria de informação visual para a interpretação humana.
- Processamento de dados de cenas para percepção automática através de máquinas.

4.2 DEFINIÇÕES

Imagem digital.

Suponha que uma imagem contínua $f(x, y)$ é aproximada por amostras igualmente espaçadas, arranjadas na forma de uma matriz $N \times M$.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,M-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

O lado direito da equação acima, representa o que é normalmente denominado de imagem digital.

Pixel.

Cada elemento da matriz de uma imagem digital denomina-se um elemento de imagem, pixel (abreviação de “picture element”).(Gonzalez, 2000).

Estes elementos possuem propriedades espaciais e espectrais

- Variável espacial define o tamanho aparente de cada pixel.
- Variável espectral define a intensidade da resposta espectral para aquele pixel.

Histograma.

O histograma de uma imagem digital com níveis de cinza no intervalo [0, L-1] é uma função discreta $p(r_k)=n_k/n$ em que r_k é o k -ésimo nível de cinza, n_k é o número de pixels na imagem com esse nível de cinza, n é o número total de pixels na imagem e $k = 0, 1, 2, \dots, L-1$.

Assim, cada barra do histograma representa a quantidade de níveis de cinza de uma imagem.

Matching de Histograma.

É desejável algumas vezes, obter uma distribuição homogênea dos níveis de cinza entre duas imagens, ou a um formato de histograma pré-determinado. É interessante este tipo de processamento digital de imagens, por exemplo, para efetuar um mosaico de diversas imagens de uma mesma área, obtida por sensores em épocas de diferentes iluminações, o que gera imagens com níveis de cinza diferentes (Richard, 1993).

O *matching* de histograma permite tornar homogêneas as curvas dos histogramas entre as imagens, diminuindo, por exemplo, o efeito da sazonalidade entre as imagens.

Outra utilização deste processo é o *matching* de histograma entre as imagens pancromáticas e multiespectrais, diminuindo as diferenças de níveis de cinza, durante o processo de fusão de imagens.

Para efetuar o *matching* de histograma entre duas imagens, sabemos que:

O Histograma é uma função contínua $h(x)$, onde:

x - Variável contínua representando o valor de níveis de cinza.

h - Probabilidade da ocorrência ou frequência de um valor.

O Peso de uma barra do histograma é determinado por:

$H(x)dx$, onde dx é o valor do incremento que geralmente, pode ser definido por:

$$Dx = (L-1)/L \text{ onde:} \tag{2}$$

L - Número total de valores de cinza.

Para realizar o ajuste de histograma, necessitamos gerar histogramas cumulativos das duas imagens.

O *matching* de histograma entre duas imagens pode ser dividido em duas etapas:

1. Equalizar o histograma da imagem a ser modificada
2. Modificar este histograma para o formato da imagem fonte $y=f(x)$

Formulação para o método:

$$Y = g^{-1}(z), z = f(x) \text{ ou } y = g^{-1}\{f(x)\}. \text{ (Richard, 1993).} \quad (3)$$

Onde:

x é um vetor de tons de cinza

$z = f(x)$ é a função que uniformiza os valores do vetor a fonte

$y = g^{-1}$ é a função que uniformiza os valores do vetor referencia

Coefficiente de Correlação, Média e Matriz de covariância.

O Coeficiente de Correlação baseia-se na matriz de covariância R , onde por exemplo:

$$R = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.76 \\ 0.76 & 1.00 \end{bmatrix} \text{ (Richard, 1993).} \quad (4)$$

Nesta matriz R , as bandas espectrais estão 76% correlacionadas. Quanto mais próximo de 1, mais correlacionados os valores, quanto mais próximo de 0, menos correlacionadas os mesmos.

Média:

$$m = E(x) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k x_j \quad (5)$$

onde

X é o vetor de pixels

K número total de pixels no vetor.

E é a expectativa da posição do pixel no espaço do vetor multiespectral

Matriz de Covariância:

$$\sum_x = E\{ (x - m)(x - m)^t \} \quad (6)$$

onde

o subscrito t significa o vetor transposto.

m é a média

Após a fusão, necessita-se verificar a interferência que o método causou nas imagens denominadas híbridas em relação às originais e para tanto, utilizamos o coeficiente de correlação, banda a banda, entre as bandas originais e híbridas correspondentes para esta finalidade. Assim utilizaremos este balizador, para verificar a interferência que os métodos utilizados para fusão de imagens geram.

Conclui-se o objetivo do presente capítulo, conceituando imagem digital, pixel, histograma, *matching* de histograma e coeficiente de correlação.

CAPITULO 5 – FUSÃO DE IMAGENS DE DIFERENTES RESOLUÇÕES

Neste capítulo, descreve-se quais métodos serão avaliados, apresentando-se suas formulações matemáticas, bem como os algoritmos desenvolvidos para a realização dos testes.

Um dos problemas básicos em fusão de imagens é que alguns processos melhoram visualmente o conjunto final porém alteram o valor espectral original. Outros alteram pouco o valor espectral o que permite classificações mais apuradas, porém não geram imagens com resultado visual melhorado.

A fusão de imagens de diferentes resoluções tem sido utilizada para a melhoria da qualidade visual de imagens multiespectrais utilizando imagens da mesma região, obtidas por sensores de melhor resolução espacial. Métodos foram criados, alguns largamente testados, outros simplesmente apresentados à comunidade científica. (Chavez, 1991).

Basicamente poderíamos distinguir estes métodos entre:

- 1) Substituição de bandas.
- 2) Conversão entre os espaços de cores.
- 3) Transformadas de imagens (CPA)
- 4) Utilização de filtros.

No primeiro, é gerado um conjunto de melhor visualização a partir da substituição de uma das bandas da imagem multiespectral pela banda pancromática.

No segundo, um conjunto multiespectral é transformado para um novo espaço de cores, separando os componentes comuns entre as bandas, para

posterior substituição pela banda pancromática, retornando a seguir ao espaço de cores original.

No terceiro, um conjunto multiespectral é transformado num novo conjunto com o mesmo número de bandas, sem nenhuma correlação entre si.(Crosta, 1993).

No último, são aplicados filtros sobre a banda pancromática, e a imagem resultante é adicionada, pixel a pixel, a uma ou mais bandas do conjunto multiespectral.

5.1 Materiais

Acessórios:

Filmadora e Câmera fotográfica utilizada para verificar a verdade de campo, registrando os locais de interesse para o presente estudo.

Hardware:

Notebook Toshiba CDS 2100

Processador AMD K6-II de 450 MHz

96MB RAM

4GB disco rígido.

Scanner de mesa para passar para meios digital as fotografias tiradas durante a visita a campo.

Softwares:

Sistema para Processamento de imagens

ENVI 3.2

MULTISPEC

MATLAB

Linguagem de programação visual

IDL 5.2.1 Win32 (x86)

Imagens digitais.

A utilização e finalidade dos softwares serão explicadas nos capítulos subseqüentes.

5.2 Métodos de Fusão

A combinação de resolução usando dados do mesmo satélite (por exemplo, pancromática e multiespectral do SPOT) é direta (Pohl, 1999). Mas também é aplicável a imagens de satélites diferentes transportando sensores semelhantes (por exemplo, SPOT multiespectral e IRS-1C PAN). Algumas das abordagens para a fusão (como, por exemplo, Transformação HSV e Substituição da Componente Principal) já estão implementadas em software comerciais, como o ENVI e ERDAS IMAGINE. Também os provedores de imagem já integraram produtos de fusão de resolução no catálogo de produtos padrão. Exemplos são imagens SPOT e IKONOS. Porém, muito freqüentemente os usuários tem que ajustar parâmetros individuais do processo de fusão; um bom exemplo é o uso de combinações aritméticas que permitam ao usuário pôr pesos diferentes nas imagens de entrada para realçar características relevantes à aplicação.

O principal interesse na fusão de imagens de diferentes resoluções é a criação de imagens compostas (híbridas) de interpretabilidade melhorada. As imagens devem ter o maior conteúdo de informação espacial possível e preservar a qualidade da informação espectral. (Cliché et al, 1985). Vários estudos foram realizados sobre a fusão da melhor resolução espacial das bandas pancromáticas, com a quantidade de informações espectrais das bandas multiespectrais, gerando imagens híbridas, visando uma melhor interpretação visual, ou uma melhor resolução espacial que possibilite melhor segmentação e classificação das imagens (Carper, 1990; Chavez et al, 1991; Cliché et al, 1985).

Através da utilização destes métodos sobre as imagens do IKONOS, serão aferidos os resultados, através do cálculo de correlação entre as imagens híbridas e as originais, gerando tabelas, que possibilitem analisar os resultados, sobre as alterações ocasionadas pela utilização de determinado método.

SUBSTITUIÇÃO

O método de fusão por substituição descrito por Jensen, 1994 consiste em alguns passos:

- 1) Reamostragem de todas as bandas de menor resolução espacial, através da interpolação bilinear, para manter os dois conjuntos na mesma resolução espacial;
- 2) Registro de imagens;
- 3) Verificação através do método de correlação, a mais correlacionada dentre as bandas multiespectrais e a PAN (banda pancromática) de melhor resolução espacial.
- 4) Ajuste de histograma entre a banda multiespectral escolhida e a banda pancromática;
- 5) Substituição da banda multiespectral escolhida, pela banda pancromática;
- 6) Projeção no canhão de cores RGB (Red, Green, Blue), do conjunto resultante da fusão.

Este método possui a vantagem de não alterar os valores radiométricos de quaisquer uma das bandas. (Jensen, 1994).

CPA (Análise das Componentes Principais)

O método CPA (Principal Component Analysis), também conhecido por Karhunen-Loève ou Transformada de Hotelling (Richards, 1993) (Gonzalez, 2000), se caracteriza por:

- 1) Separabilidade das informações contidas num conjunto de bandas multiespectrais;

- 2) Geração de um novo conjunto, de igual número de bandas, onde a primeira componente é responsável pela maioria das informações comuns às bandas originais.

Este método da fusão pela utilização das Componentes Principais consiste dos seguintes passos:

- 1) Reamostragem de todas as bandas de menor resolução espacial, através da interpolação bilinear, para manter os dois conjuntos na mesma resolução espacial;
- 2) Construção da matriz de covariância da imagem a ser transformada;
- 3) Determinação dos autovalores e autovetores da matriz de covariância;
- 4) Formação das componentes usando os autovetores da matriz de covariância como pesos. Assim, o primeiro autovetor, produz a primeira componente, o segundo autovetor, a segunda componente, e assim por diante (Richards, 1993);
- 5) Ajuste do histograma entre a PAN (banda pancromática) e a CP1(componente principal 1);
- 6) Substituição da CP1 pela PAN;
- 7) Efetuar a transformada inversa de Hotelling, para o espaço RGB de cores.

Fórmula para utilização das Componentes Principais (Richards, 1993).

- | | |
|--------------------------|-----------------|
| 1) Valor médio | Definido em (5) |
| 2) Matriz de covariância | Definida em (6) |

3) Matriz de Correlação

$$Q_{ij} = V_{ij} \sqrt{v_{ii}v_{jj}} \quad (7)$$

Onde:

Q_{ij} : Elemento da matriz de correlação

V_{ij} : Elementos da matriz de covariância

v_{ii} e v_{jj} : Variâncias do i -ésimo e j -ésimo elementos de dados das bandas.

4) Cálculo dos autovalores:

$$|\Sigma_x - \lambda I| = 0 \quad (8)$$

Onde:

Σ_x = Covariância do pixel no espaço x .

I = Matriz Identidade

λ = Autovalores

5) Cálculo dos autovetores:

$$[\Sigma_x - \lambda_i] g_i = 0 \quad (9)$$

Onde:

Σ_x = Matriz inversa dos autovetores

λ = autovalores

g_1 = matriz bidimensional para 2 bandas

6) Transformada das Componentes principais:

$$y=Gx$$
$$\sum_y = G \sum_x G^1 \quad (10)$$

Onde:

\sum_x : Covariância do pixel no espaço x

G = Matriz transposta dos autovetores do \sum_x

\sum_y : Matriz diagonal dos autovalores de \sum_x

Para a transformação das componentes principais são necessários três passos:

- 1) Construir a matriz de covariância da imagem a ser transformada
- 2) Determinar os autovalores e autovetores da matriz de covariância
- 3) Utilizar os autovetores através de combinação linear, onde o primeiro autovetor gera a primeira componente principal, o segundo a segunda componente principal, e assim sucessivamente.

A justificativa para a substituição da componente principal 1 (CP1) pela banda pancromática (PAN) decorre da similaridade entre as mesmas, pois a CP1 contém as informações comuns para as bandas usadas como entrada para a CPA, e que as informações espectrais, são mantidas nas outras componentes. (Chavez, 1986).

HSI (Matiz, Saturação e Intensidade)

No método HSI (Carper, 1990), as três bandas de baixa resolução espacial são transformadas do espaço de cores RGB para o espaço HSI que se refere à maneira da percepção da cor pelos seres humanos.

A transformada converte valores RGB para HSI, com valores de acordo com: Hue (Matiz) entre:

0 e 120 = Vermelho

121 e 240 = Verde

241 e 360 = Azul

O método de fusão pela transformação entre espaços de cores de RGB para HSI consiste dos seguintes passos:

- 1) Reamostragem de todas as bandas de menor resolução espacial, através da interpolação bilinear, para manter os dois conjuntos na mesma resolução espacial;
- 2) Transformação das imagens multiespectrais para o espaço de cores HSI;
- 3) *Matching* de histograma entre a banda pancromática e a componente I (Intensidade);
- 4) Substituição da imagem referente à componente I (Intensidade) pela imagem pancromática após ajuste de histograma;
- 5) Efetuada a operação inversa, retomando para o espaço RGB.

Formulação para conversão RGB-HSI de cores (Gonzalez, 2000).

Nesta formulação os valores de r, g e b (minúsculos) significam os valores de red, green e blue, normalizados no intervalo [0, 1] e os valores expressos por R, G e B (maiúsculos) os valores originais.

1) Normalização dos valores (intervalo [0, 1]).

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (11)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (12)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (13)$$

2) Componente Intensidade:

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B) \quad (14)$$

3) Componente Saturação:

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (15)$$

4) Componente Hue (Matiz):

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{\left[\frac{1}{4}[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)] \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (16)$$

Formulação para conversão HSI-RGB (Gonzalez, 2000).

1) Dependendo do valor de H.

a. Setor RG($0^\circ \leq H \leq 120^\circ$)

$$i. \quad b = \frac{1}{3}(1-S) \quad (17)$$

$$ii. \quad r = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (18)$$

$$iii. \quad g = 1 - (r + b) \quad (19)$$

b. Setor GB($120^\circ < H \leq 240^\circ$)

$$i. \quad H = H - 120^\circ \quad (20)$$

$$ii. \quad r = \frac{1}{3}(1-S) \quad (21)$$

$$iii. \quad g = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (22)$$

$$iv. \quad r = 1 - (g+b) \quad (23)$$

c. Setor BR($240^\circ < H \leq 360^\circ$)

$$i. \quad H = H - 240^\circ \quad (24)$$

$$ii. \quad g = \frac{1}{3}(1-S) \quad (25)$$

$$iii. \quad b = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (26)$$

$$iv. \quad r = 1 - (g+b) \quad (27)$$

A justificativa para a substituição da componente I (Intensidade) pela imagem pancromática, é que a componente I é acromática, sendo possível a sua substituição pela banda pancromática, sem interferir nas cores e saturação. (Chavez, 1991).

HSV (Matiz, Saturação e Valor)

O método HSV (Carper, 1990), é semelhante ao HSI anteriormente descrito, porém o algoritmo utilizado pelo software ENVI utilizou os parâmetros adotados pelos geólogos da USGS U. S. Geological Survey para caracterizar a cor dos solos e rochas.

A transformada converte valores RGB para HSV, com valores de acordo com:

Hue (Matiz) entre:

0 e 120 = azul

121 e 240 = verde

241 e 360 = vermelho

Saturação: 0 e 255 com os valores mais altos representando cores puras

Valor: De 0 a 255 com os valores mais altos, representando cores mais brilhantes. (Kruse and Raines, 1994).

HPF (Filtro Passa-Alta)

O Filtro Passa-Alta, utilizado para detecção de bordas (limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas nos níveis de cinza de uma imagem. (Gonzalez, 2000)) é utilizado em fusão de imagens, pelo seguinte método.

1. Reamostragem de todas as bandas de menor resolução espacial, através da interpolação bilinear, para manter os dois conjuntos na mesma resolução espacial;

2. *Matching* de histograma entre a imagem pancromática, e cada uma das bandas da imagem multiespectral;
3. Aplicação do Filtro Passa-Alta sobre a banda da imagem pancromática;
4. Adição, pixel a pixel da imagem resultante, a cada uma das imagens das bandas multiespectrais.

A aplicação do Filtro Passa-Alta, descrito por (Gonzalez, 2000) foi implementado, utilizando a expressão de soma Pixel a Pixel entre as bandas.

$$\sum b_{hib} = (b_1 + P)/2 + (b_2 + P)/2 + (b_3 + P)/2 \text{ onde:} \quad (28)$$

b_{hib} banda híbrida resultante

b_1, b_2, b_3 bandas 1, 2 e 3.

P Banda pancromática com filtro passa alta com máscara 3x3.

Assim, concluímos a definição dos métodos de fusão e processos a serem utilizados no passo de aplicação a conjuntos de imagens do LANDSAT 7 e IKONOS, visando à obtenção dos resultados a serem analisados.

CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 7.

Para aplicação dos métodos de fusão sobre imagens de satélite, inicialmente escolhemos os softwares ENVI 3.2, MULTISPEC e MATLAB, cada um com sua característica específica.

O ENVI 3.2 é voltado para processamento de imagens, com vários filtros e funções, como o registro imagem – imagem, reamostragem classificação, e trabalho com bandas individuais.

O MULTISPEC, também é um software para tratamento em manipulação de imagens, e inicialmente seria utilizado para transformar as imagens híbridas geradas pelo ENVI 3.2 em formato RAW, para ser lido pelo Software MATLAB, no qual seriam efetuados todos os cálculos estatísticos necessários.

O MATLAB é utilizado para processamento matricial e cálculos estatísticos. Foi utilizado este pacote de software para o processamento de imagens do LANDSAT 7, e todo o processo funcionou baseado na comparação entre o coeficiente de correlação das imagens originais com as imagens híbridas.

Foi efetuada a aplicação dos métodos descritos anteriormente, sobre um conjunto de bandas multiespectrais e pancromática do satélite LANDSAT 7, (figuras 4(a) e 4(b) Curitiba, 2000), como referência aos trabalhos anteriormente efetuados, e para validar o processo e softwares descritos acima.



4(a)



4(b)

Figura 3: Imagens Multiespectrais(a), Pancromática(b), (LANDSAT 7) Originais de Curitiba, 2000.

Todos os métodos foram aplicados, apresentando coeficientes de correlação próximos aos apresentados em trabalhos anteriores(Chavez, 1991), o que comprovou um ponto de partida coerente para nossos testes com a nova plataforma.



Figura 3(a) Fusão Landsat 7 pelo método da SUBSTITUIÇÃO

A grande vantagem do método da Substituição é a possibilidade de escolha da banda inicial para efetuar a fusão, sendo possível ressaltar características específicas, como vegetação, solos, área urbana. Neste caso foi escolhida a substituição da banda 5 do conjunto de bandas 3, 4 e 5, o que ressalta a vegetação. Nota-se porém, que apesar da melhor visualização das áreas verdes, perde-se a qualidade visual da área urbana.



Figura 3(b) Fusão Landsat 7 pelo método HSV



Figura 3(c) Fusão Landsat 7 pelo método HSI



Figura 3(d) Fusão Landsat 7 pelo método CPA

Visualmente, os métodos que obtiveram melhores resultados em relação às áreas urbanas, foram os do HSV, HSI e CPA, pois identificaram com maior nitidez os detalhes referentes à mata, campos, água e área urbana.

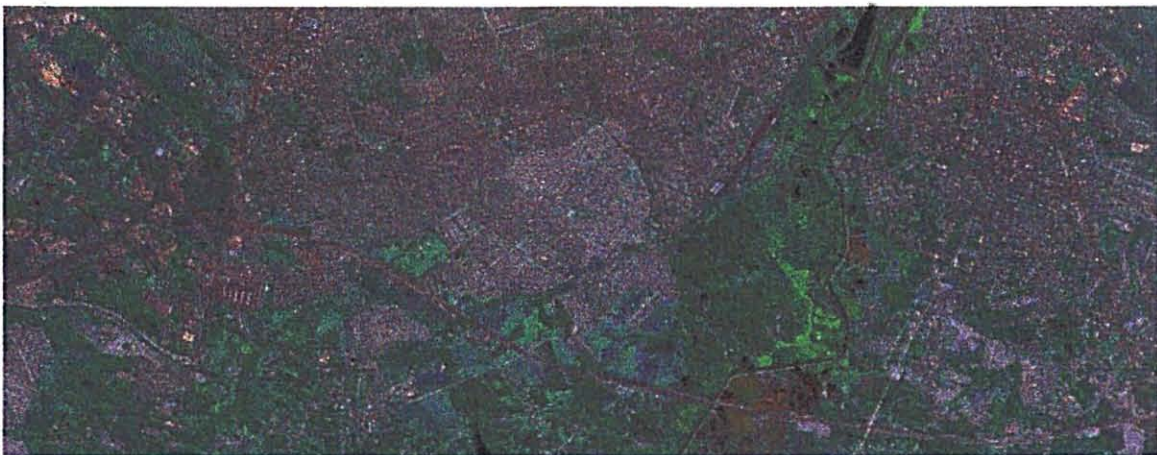


Figura 3(e) Fusão Landsat 7 pelo método HPF

Este último método, visualmente inferior a todos os outros, torna difícil a separação dos objetos, gerando confusão entre várias feições, como área urbana, ruas, e boa parte do solo descoberto.

Na tabela 2, as colunas 2 a 6 identificam os métodos de fusão. Os valores apresentados são os coeficientes de correlação entre as bandas originais e as correspondentes bandas do conjunto resultante híbrido. Na fusão por substituição, verifica-se que a correlação entre a banda PAN e a banda 2 é de 0.78%, enquanto as outras bandas não sofreram alteração e mantiveram correlação de 100%. Nos métodos HSV, HSI e CPA, a banda 3 da imagem híbrida apresenta baixa correlação com a original; já a correlação entre as bandas 1 e 2, híbrida e original, resultaram semelhantes. Dentre os métodos, a utilização do HPF produziu correlações mais altas, preservando mais as informações espectrais.

Original/Híbrida	HPF	HSV	HSI	CPA	SUB
Banda 5	0.670124	0.940685	0.867225	0.897259	0.783512
Banda 4	0.772808	0.895293	0.803409	0.920870	1.000000
Banda 3	0.707344	0.912300	0.808716	0.882346	1.000000

Tabela 2: Coeficiente de correlação entre imagens originais e as híbridas do LANDSAT 7 Curitiba, 2000.

Os valores obtidos, nos cálculos de correlação entre as imagens originais e as híbridas foram semelhantes, em torno de 67% a 100%, mostrando o grau de correlação e a interferência dos métodos de fusão em concordância a trabalhos anteriores efetuados, como por exemplo, Chavez (1991).

O método que mais preservou as informações espectrais foi o HPF, e o que mais distorceu foi o HSI, porém, na imagem ora em estudo, o HPF foi o de maior distorção, seguido pelo HSI, sendo o melhor, o HSV e da SUB. A

diferença em relação ao HPF pode ser explicada, pois somente foi utilizado filtro 3 x 3 nas imagens.

Verificou-se a melhoria visual realizada sobre o conjunto de imagens, ressaltando os objetos das mesmas, e na tabela de correlação entre bandas, o quanto o método aplicado interfere nos valores espectrais originais. Estes métodos de fusão melhoram as informações visuais neste nível de resolução espacial, porém para elementos grandes no terreno, como estradas, conjuntos urbanos, matas e campos. Detalhes como construções, pequenos rios, ruas e outros, são obtidos pela média de sua reflectância dos elementos que estão contidos na capacidade do sensor.

O nível de detalhes numa resolução espacial de 30 metros não possibilita uma análise sobre elementos distintos, pois o pixel de 30x30 metros, representa o brilho médio desta área. Sendo assim, numa área, por exemplo, composta por árvores, campos e solos, o valor espectral do pixel, será a média entre estes elementos:

Assim iremos aplicar o mesmo processo nas imagens do IKONOS, e verificar se houve mudança de comportamento relevante.

CAPÍTULO 7 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO SOBRE IMAGENS DO SATÉLITE IKONOS.

A partir dos testes efetuados anteriormente, iniciamos os trabalhos com imagens do IKONOS. Neste ponto, iniciaram-se os problemas. Primeiro para a obtenção das imagens deste sensor.

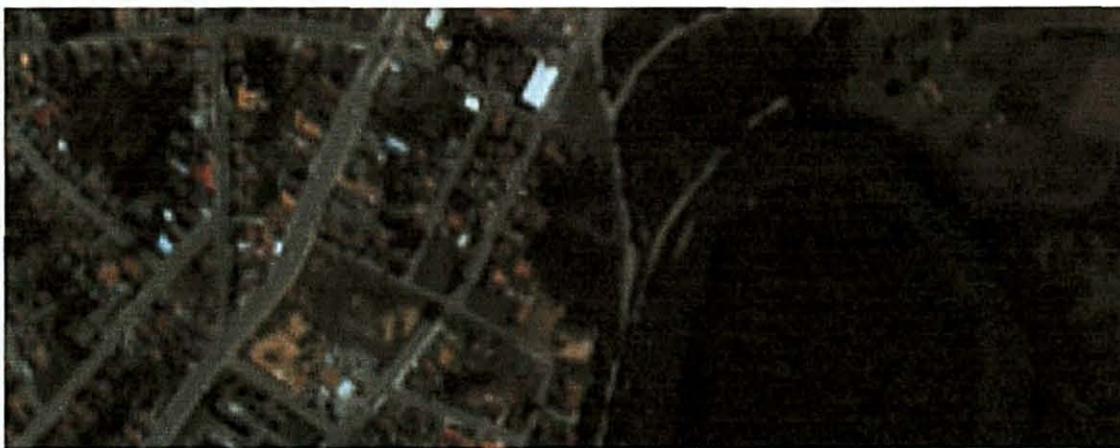
Solicitamos as imagens a ENGESAT, e estas vieram com a resolução radiométrica correta, possibilitando o início dos trabalhos. Após efetuarmos os primeiros testes, e terem sido gerados os números de coeficiente de correlação, obtivemos valores na ordem de 5% a 6%, o que indicavam algum erro no processamento, bem como uma adulteração no aspecto visual da imagem. Verificamos novamente todo o conjunto, e identificamos que durante o salvamento das imagens do ENVI 3.2 para serem processadas pelo MATLAB, houve diminuição da resolução radiométrica para 8 BITS novamente.

Decidimos então, retirar do processo os softwares MATLAB e MULTISPEC, e trabalhar somente com o ENVI 3.2, pois este possuía uma linguagem IDL de desenvolvimento aberta, que possibilitava alterar este comportamento apesar de ser o responsável pela diminuição da resolução.

Vários programas foram desenvolvidos (ANEXO A), para possibilitar o trabalho com as novas imagens do satélite IKONOS, pois processos simples, como concatenação de bandas, salvamento dos arquivos, cálculos estatísticos, todos apresentavam problemas referentes à falta de preparo dos softwares existentes no mercado para a nova plataforma. Verificamos outros softwares, como o IDRISI e novas versões do atual software em uso como a versão 3.4, e ainda esta apresenta o problema.

Após várias verificações do processo como um todo, confrontando imagens originais, contra elas mesmas, e obtendo valores de correlação de

100%, ou comparando os valores dos pixels entre as imagens geradas e as originais, recebemos um conjunto de imagens do município de Rio Negro, no estado do Paraná, coletadas em 2000, imagens estas obtidas junto ao PARANÁ CIDADE e por se tratar de imagens, que possuíam todos os elementos desejáveis ao presente estudo, como vegetação, água, área urbana, e por ser de mais fácil acesso, efetuamos a aplicação dos métodos descritos anteriormente, sobre um conjunto de bandas multiespectrais e pancromática do satélite IKONOS (figuras 6(a) e 6(b)).



6(a)



6(b)

Figura 4: Imagens Multiespectrais (a), Pancromática(b) Original de Rio Negro, 2000.

O IKONOS possui capacidade para imagear 1 metro de resolução espacial na banda pancromática e 4 metros nas bandas multiespectrais, e distinguir 2048 níveis de cinza, o que torna a fusão de imagens muito interessante, pois permite a identificação de elementos bem distintos, como

veremos a seguir. Iniciamos os trabalhos de aplicação dos métodos sobre as imagens de parte do município de Rio Negro situado aproximadamente na Latitude 26° 05'45" S e longitude 49° 47'20" W, no Estado do Paraná.

Primeiro foi aplicado o método de substituição, onde somente uma das bandas multiespectrais é substituída pela banda pancromática e projetada no canhão RGB de cores.

Este é o processo muito simples no qual o software existente (ENVI 3.2) foi eficiente na sua execução, porém quando solicitado o salvamento da imagem gerada, o software não estava preparado para gerar imagens de 11 bits de resolução, gerando uma imagem com valores máximos na ordem de 8 bits, alterando totalmente o resultado.

Para o método de substituição, elaboramos um programa, que seleciona dois arquivos de entrada, obtém informações sobre os mesmos, e grava um arquivo de saída com a fusão das bandas escolhidas entre duas bandas multiespectrais com a banda pancromática, já efetuando o *matching* de histograma e ao final, efetua os cálculos de correlação entre as bandas geradas.



Figura 4(a) Fusão IKONOS pelo método da SUBSTITUIÇÃO

Escolheu-se neste estudo a substituição da banda 2 pela pancromática, pois este conjunto ressalta a vegetação, e como podemos perceber na imagem final na figura 4(a). Vários aspectos ficam ressaltados a partir da fusão, permitindo uma excelente visualização dos detalhes, quer sejam referentes à vegetação, ou nas outras classes, como arruamento, solos, água, em relação à imagem RGB original 6(a). Detalhes como distinção entre árvores e edificações e as sombras das mesmas, e possibilidade de identificação dos vários tipos de coberturas vegetais, são características deste método.

Ocorreu uma pequena sombra avermelhada em alguns elementos da imagem como, por exemplo, o telhado branco de uma empresa, posteriormente identificada em visitas a campo como empresa Maiko, inicialmente suposto como um problema no registro imagem – imagem, problema este, comprovadamente não existente.

O próximo método aplicado, do HSV, necessitou a construção de um programa (ANEXO A), baseado na formulação matemática apresentada na revisão bibliográfica descrita anteriormente.

Após conversão de RGB para HSV, a componente V (value) foi efetuado o *matching* com a banda pancromática e processado a conversão inversa para RGB, gerando a imagem 7(b) abaixo.



Figura 4(b) Fusão IKONOS pelo método HSV

Apesar da diferença visual apresentada em relação à imagem resultante do processo de substituição, muito se aproximou em relação visual à imagem original RGB, ressaltando os detalhes que a primeira imagem não contemplava. As cores se mantiveram fiéis às originais, e detalhes como solo exposto, telhados, edificações são bem definidos e visíveis.

Os contornos das edificações e arruamentos nestas imagens tornaram-se bem nítidos, porém tornou-se difícil a distinção entre água e sombras, bem como entre arruamento e parte da vegetação.

A seguir, aplicamos o método de fusão HSI, muito parecido com o método HSV, implementando um programa que chamava função disponível no software ENVI 3.2. (ANEXO A) Após a conversão, utilizamos os mesmos programas que salvam e calculam estatísticas, anteriormente utilizados, gerando a imagem 7(c)



Figura 4(c) Fusão IKONOS pelo método HSI

Esta imagem apresenta um detalhamento semelhante à anterior HSV, melhorando o aspecto referente às sombras das matas ciliares sobre o rio, e mantendo a mesma nitidez dos outros elementos. Manteve também, a dificuldade de distinção entre arruamento e certos tipos de vegetação. Houve uma tendência para a cor azul, em toda a imagem, o que aprofunda a dificuldade desta distinção.

Seguindo o processo, aplicamos o método CPA das componentes principais, gerando um programa que chama uma função de conversão para as componentes principais (ANEXO A), substituindo a componente principal 1, após efetuar o *matching* de histograma entre esta e a banda pancromática, e efetuando a transformada inversa.



Figura 4(d) Fusão IKONOS pelo método CPA

Nestas imagens, podemos perceber, alguns problemas com o tratamento de cores, onde os telhados foram ressaltados anormalmente, tendendo para o azul ou vermelho, e manteve-se o problema de dificuldade de distinção entre o arruamento e vegetação.

Finalmente, aplicamos o método HPF, através de programa desenvolvido (ANEXO A), e este foi o método que apresentou a maior complexidade para ser

realizado, pois trabalha com parâmetros limites, originalmente para não ultrapassar os 255 níveis de cinza das imagens de 8 bits, e atualmente com os 2048 níveis de cinza das imagens do IKONOS, este problema se ressaltou. A passagem do filtro passa-alta, sobre uma imagem de alta resolução, com detalhes bem definidos, gerou problemas nos contornos dos mesmos, e não melhorou de forma geral a visualização dos objetos, conforme podemos verificar na imagem 7(e).



Figura 4(e) Fusão IKONOS pelo método HPF

Este método apresentou o pior resultado visual de todos, bem como exige a limitação dos valores ocorridos durante a soma pixel a pixel das bandas multiespectrais com a banda pancromática.

Na tabela 3, as colunas 2 a 6 identificam os métodos de fusão. Os valores apresentados são os coeficientes de correlação entre as bandas originais e as correspondentes bandas do conjunto resultante híbrido. Na fusão por substituição, verifica-se que a correlação entre a banda PAN e a banda 2 é de 0.64%, enquanto as outras bandas não sofreram alteração e mantiveram correlação de 100%. Nos métodos HSV, HSI e CPA, a banda 3 da imagem híbrida apresenta baixa correlação com a original; já a correlação entre as bandas 1 e 2, híbrida e original, resultaram semelhantes. Dentre os métodos, a utilização do HPF produziu correlações mais altas, preservando mais as informações espectrais.

Original/Híbrida	HPF	HSV	HSI	CPA	SUB
Banda 1	0.797609	0.735845	0.735555	0.738655	1.000000
Banda 2	0.905969	0.683916	0.678923	0.678993	0.643710
Banda 3	0.870506	0.435456	0.643456	0.437975	1.000000

Tabela 3: Coeficiente de correlação entre imagens originais e as híbridas do IKONOS Rio Negro, 2000

Podemos verificar a melhoria visual realizada sobre o conjunto de imagens, ressaltando os objetos das mesmas, e na tabela de correlação entre bandas, o quanto o método aplicado interfere nos valores espectrais originais.

Pode-se notar, que a fusão por substituição não altera o valor de 2 bandas, apresentando uma qualidade visual superior à apresentada ao conjunto anterior, porém, com diminuição do valor de correlação entre a banda modificada e a original.

O método que mais preservou as informações espectrais, para este conjunto de imagens foi o HPF ao contrário do conjunto anteriormente processado (tabela 2), enquanto que os piores (HSI e CPA) apresentaram valores muito próximos.

CAPÍTULO 8 – SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.

8.1 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

Método mais utilizado em análises quantitativas em Sensoriamento Remoto, baseado em algoritmos que rotulam pixels numa imagem, representando tipos particulares de cobertura vegetal, ou classes. (Richards, 1993).

Os passos para execução desta classificação são:

- 1) Selecionar um grupo de tipos de coberturas ou classes para segmentação da imagem. Neste estudo, determinamos como objetos de estudo, a água, mata fechada, campos, solos, arruamento, edificações, sombras.
- 2) Escolher amostras de cada uma das classes para treinar o classificador.
- 3) Classificar cada pixel da imagem, de acordo com as amostras determinadas.
- 4) Produzir tabelas ou mapas temáticos que sumarizem o resultados obtidos.

Existem diversos algoritmos, como o de Máxima Verossimilhança, e Paralelepípedo. Segundo Richards, 1993 o de Máxima Verossimilhança, é o de maior utilização em Sensoriamento Remoto e baseia-se num conjunto de probabilidades, que indicam a maior probabilidade de um pixel pertencer a uma determinada classe.

Este método de classificação mostra-se eficiente, quando podemos estimar um valor de média e matriz de covariância para cada classe, com precisão, e dispomos de vários "pixels" bem determinados por cada classe.

O número de pixels para cada classe espectral deve ser calculado em pelo menos $N + 1$ exemplos por classe, onde N é o número de dimensões, para evitar que a matriz de covariância não abranja uma população expressiva de elementos. Assim, segundo Swain e Davis(1978) apud (Richards, 1993), é recomendado um número mínimo de $10 N$ pixels por classe, e desejável $100 N$, se possível.

Neste Capítulo, efetuamos o detalhamento das diferenças resultantes da classificação, indicando a existência ou não de relação entre o melhor ou pior grau de correlação entre imagens originais e híbridas, com o resultado prático de classificação de imagens.

Efetuamos a aplicação da classificação supervisionada, pelo método de Máxima Verossimilhança, sobre os conjuntos de imagens geradas anteriormente, os quais geraram as imagens das figuras 8(a), 8(b), 8(c) 8(d) e 8(e), além da tabela 4, contendo os comparativos estatísticos e numéricos efetuados entre os vários tipos de coberturas do solo.

Identificou-se os pontos sobre uma imagem base, a RGB das bandas 3, 2 e 1 do Satélite IKONOS, sem transformação a não ser a reamostragem bilinear para permitir o registro imagem – imagem com a banda pancromática.

A partir desta, aplicou-se as mesmas amostras adquiridas nos mesmos lugares na classificação das imagens híbridas, visando verificar se a fusão das mesmas adulterou o comportamento em relação às classes originais.

Na tabela 4, podemos identificar a legenda de cores adotada para identificar cada uma das classes, bem como a quantidade de áreas distintas na imagem de cada um dos tipos de coberturas, e a quantidade de pixels adotados.

Tipo de Cobertura	Legenda	Áreas Distintas	Quantidade de pixels
Sombras	Preto	5	463
Solos	Amarelo	8	1893
Mata	Verde mar	8	1602
Campos	Verde claro	6	1732
Edificações	Coral	11	1975
Asfalto	Azul escuro	12	1717
Água	Azul Claro	13	1709

Tabela 4 – Legenda, quantidade de pixels para classificação das imagens.

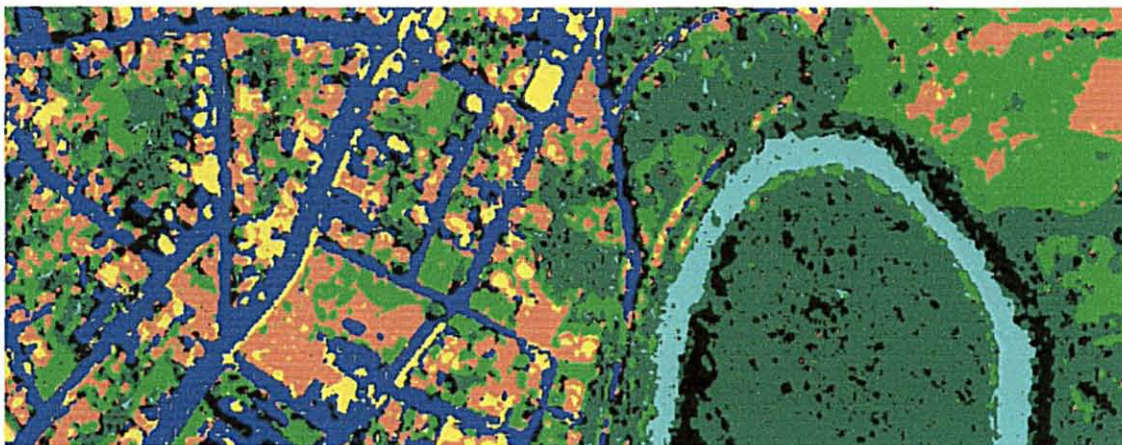


Figura 5(a) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem RGB de Rio Negro.

Na figura acima, verificamos que o classificador agrupou grande parte das classes de acordo, gerando alguns pontos de erro, verificados em campo.

- 1) Falta de definição entre a sombra da mata ciliar na região do rio.
- 2) Pequena quantidade de sombras na mata fechada
- 3) Terreno baldio e solo descoberto definido como construção.
- 4) Várias residências classificadas como solos.
- 5) Falta de definição entre residências e arruamento.

Estes pontos levantados poderiam ser trabalhados, visando à melhoria dos parâmetros das classes definidas para classificação, porém, um dos objetos de estudo deste trabalho, é a maneira como os programas existentes, se comportam em relação às imagens híbridas. Assim adotou-se as amostras dos mesmos locais delimitados na imagem RGB das bandas 3, 2 e 1, e aplicou-se o classificador nas imagens híbridas, obtendo os seguintes comportamentos.

A melhoria da resolução espacial levou à redefinição das classes, obtendo imagens menos homogêneas, com maior segmentação. Na maioria das imagens, houve a migração de pontos de uma classe para outra, indicando a alteração do valor radiométrico dos pixels, como podemos notar na classe mata, que passou de verde mar, para amarelo, verde e até preto em algumas imagens. Isto representa claramente a adulteração dos valores.

Não é possível, a partir da classificação empregada sobre as imagens híbridas, a utilização da legenda existente na tabela 4, porém, percebe-se que uma nova alteração nos valores referência das classes poderia aproximar a classificação do inicial, com um nível de detalhamento bem maior.

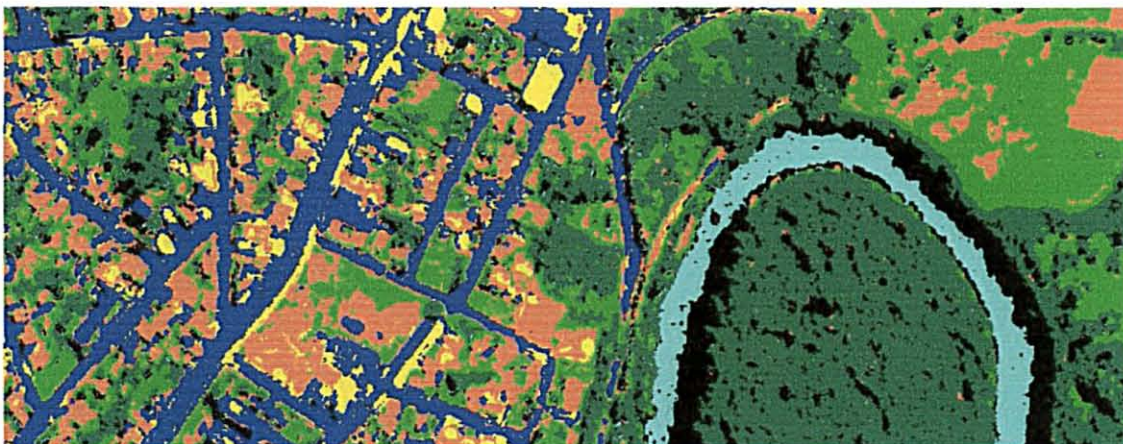


Figura 5(b) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida por SUBSTITUIÇÃO.

No processamento da imagem híbrida por SUBSTITUIÇÃO, que menos alterou o comportamento espectral, pela análise estatística, identificamos que foi

ressaltado o maior nível de detalhes, com a distinção clara entre árvores e sombras na área interna do rio. A mata ciliar, já se distingue da sombra e da água do rio, e melhorou a distinção entre elementos de solo e campos, porém mantém a confusão entre construções e solos.

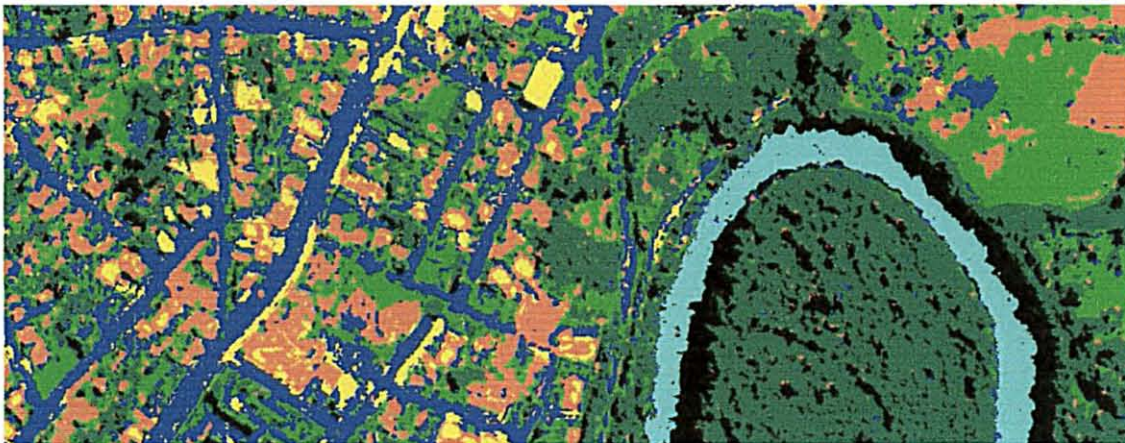


Figura 5(c) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HSV.

Comportamento semelhante ocorreu na imagem híbrida pelo método HSV da figura 5(c), porém, alguns aspectos podem ser ressaltados. Na parte superior da curva do rio, existem elementos bem identificados como uma residência, que foi agrupada na classe campo, partes da classe campo passaram para a classe asfalto, e este comportamento, não ocorreu com o resto da imagem.



Figura 5(d) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HSI.

A dificuldade de identificação de classes referida no item anterior aumentou na imagem do método HSI, assim como uma menor diferenciação entre mata e sombra.



Figura 5(e) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida CPA.

A imagem classificada pelo método CPA foi muito semelhante à obtida pelo método HSV, verificando se somente algumas distinções em relação às sombras e solos. Neste caso, verificando a tabela 5 de comparações, visualizamos uma proximidade de valores, o que confirma assertiva visual.

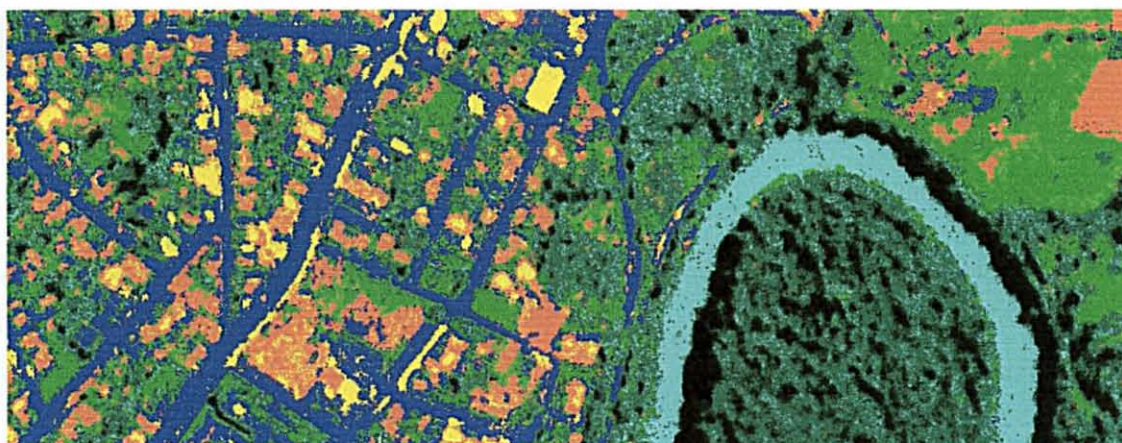


Figura 5(f) – Classificação de imagens pelo método de Máxima Verossimilhança em imagem híbrida HPF.

Das imagens classificadas, a que mais sofreu interferência na classificação, foi a HPF. A introdução de ruídos na imagem por este método segmentou a mesma.

Desta forma, verificamos que nas imagens híbridas, com maior resolução espacial, os detalhes são ressaltados aumentando a segmentação da imagem, com melhor identificação das classes. Podemos notar nestas imagens, a separação entre mata e sombra das árvores, água do rio e a sombra da mata ciliar no mesmo, o arruamento e a cobertura de terra ou areia sobre o asfalto. Detalhes estes que não eram possíveis na resolução anterior do LANDSAT de 30 Metros.

Efetuamos então o trabalho de pós-classificação, identificando a área em metros quadrados de cada classe. Nesta análise, porém, identificamos que apesar da proximidade entre algumas classes, nos vários métodos, o processo de fusão gerou conjuntos de pixels, que deslocaram de uma classe para outra em relação à imagem original sem fusão. Assim edificações da imagem original, passaram para a classe de solos, e matas passaram para a classe de solo.

Método	Água	Asfalto	Campo	Edificações	Solo	Sombras
RGB	54296(5.18%)	110029(10.49%)	210289(20.05%)	164644(15.70%)	31589(3.01%)	144687(13.80%)
SUB	50637(4.83%)	80748(7.70%)	283519(27.04%)	432626(41.26%)	34094(3.25%)	166952(15.92%)
HSV	48754 (4.65%)	175942(16.78%)	240248(22.91%)	379406(36.18%)	29557(2.82%)	174669(16.66%)
HSI	47891(4.57%)	152557(14.55%)	198507(18.93%)	435205(41.50%)	37861(3.61%)	176555(16.84%)
CPA	47881(4.57%)	165354(15.77%)	219716(20.95%)	379583(36.20%)	33395(3.18%)	202647(19.33%)
HPF	103181(9.84%)	155721(14.85%)	247857(23.64%)	117582(11.21%)	33985(3.24%)	390250(37.22%)

Tabela 5: Comparativo entre as classes das imagens originais e as híbridas do IKONOS

Segundo a tabela 5, de cálculo de área entre a imagem RGB e SUBSTITUIÇÃO, foi este processo que menos alterou as áreas de cada classe, porém verificamos que esta correlação, não se aplica como um bom fator para medir a interferência dos métodos de fusão, pois apesar de manter percentualmente uma relação muito estreita com a imagem original, verifica-se

que houve migração das classes, sendo necessário um trabalho mais apurado, de identificação de pontos específicos da área em estudo, para verificar numa área específica de cada classe, como se comportou esta migração.

Houve classes que na imagem original eram agrupadas numa única classe, por exemplo, solo, desmembramento de mais de uma classe identificando que se tratava de solos, edificações, matas e sombras, conforme confrontado com as imagens híbridas anteriores.

Neste trabalho de pós-classificação, a proximidade entre os percentuais originais e as imagens híbridas, não indicaram referencial válido para comparação.

8.2 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

Em geral, a análise de clusters pretende agrupar um determinado número de dados em classes de elementos que apresentam semelhanças entre si. Há vários tipos de análise de clusters, nomeadamente hierárquicos e não hierárquicos. O procedimento do método hierárquico é juntar sucessivamente pequenos clusters formando grandes clusters, ou dividindo grandes clusters. O resultado final do algoritmo é uma árvore de clusters chamada dendrograma, que mostra como os clusters estão relacionados. Cortando o dendrograma ao nível desejado o cluster de dados da separação do grupo é obtido.

O método não hierárquico por sua vez produz uma classificação particionando o conjunto de dados, dando origem a grupos não sobrepostos e cujas relações entre eles são não hierárquicas. Ao contrário dos métodos hierárquicos, os métodos que realizam partições dos dados não requerem que a alocação de um objeto num cluster seja definitiva.

Esta técnica de partição dos dados é baseada na idéia de otimizar algum critério pré-definido. O uso destas técnicas de partição usualmente assume que o número final de clusters seja conhecido à partida, apesar de haver alguns métodos que permitem que esse número varie ao longo da análise (Dillon, 1984).

Para o estudo em causa adotou-se pelo método particional K-means. O objetivo deste método é encontrar uma partição de dados tal que minimize o quadrado da distância euclidiana ao centro do cluster, procurando assim grupos homogêneos.

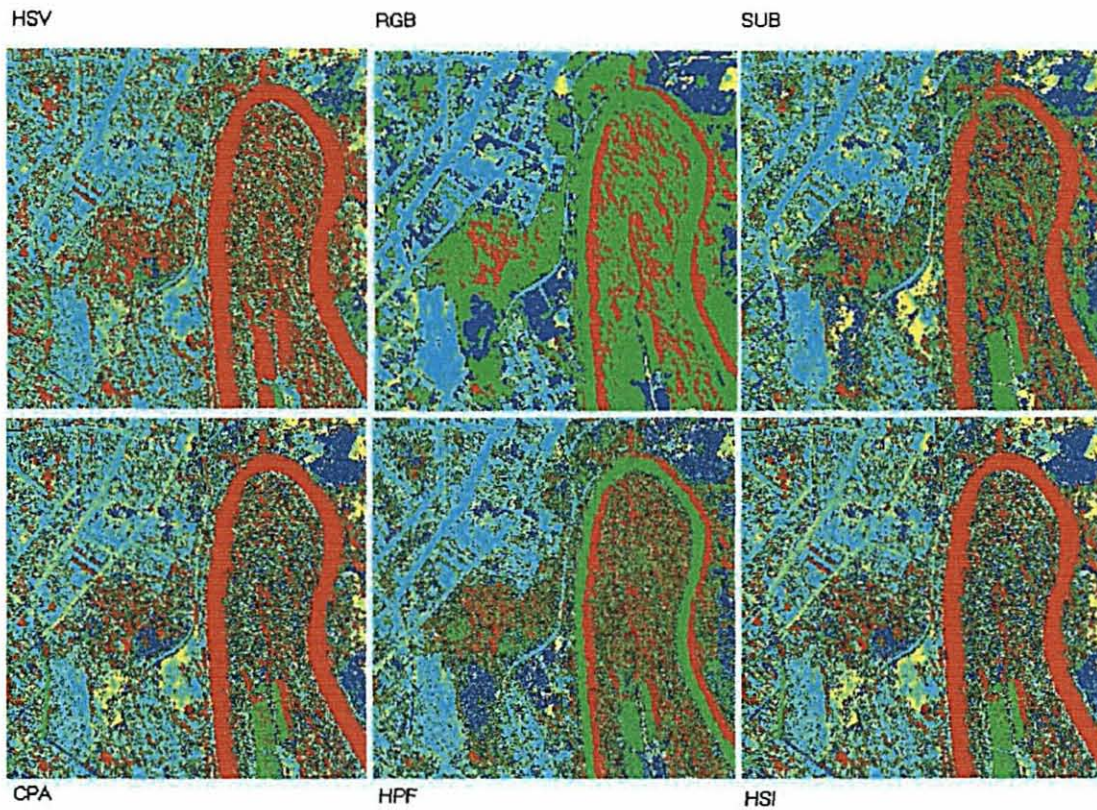


Figura 6 – Segmentação de imagens de Rio Negro, pelo método K-means

A segmentação das imagens apresentou comportamento diverso, onde as imagens em RGB e HPF conseguiram distinguir água de sombras, enquanto as imagens dos métodos HSI, HSV, SUB e CPA, uniram as duas classes.

A imagem HPF apresentou a melhor segmentação em relação às classes água e sombras, porem perdeu muito em relação às classes arruamento urbano e construções, na qual os métodos HSI E CPA permitiram uma maior separabilidade das mesmas.

CAPÍTULO 9 - AFERIÇÃO DOS RESULTADOS COM O CAMPO.

Em visita realizada à região de Rio Negro, na área em estudo, identificamos pontos das classes escolhidas. Podemos perceber, que o nível de detalhamento alcançado com a fusão de imagens do IKONOS, nos permite uma excelente distinção dos elementos do terreno.



Figura 7: Pontos verificados em campo da área em estudo.

Descrição da visita a campo:

Ponto A. Vegetação de mata nativa com o Rio Negro com águas escuras e a sombra da mata ciliar sobre a água. Estrada de chão batido ao lado do rio com trechos de pedra brita (imagens 8.1, 8.2 e 8.3).

Ponto B. Vegetação densa, rio e sombra na água do rio. (imagens 8.4 e 8.5).

Ponto C. Campos e árvores isoladas com duas residências. (imagens 8.7 e 8.8).

Ponto D. Construção com Telhado branco com telhas de eternit branco, identificado como indústria MAIKO, região do descampado e casa de telhado vermelho forte. (figuras 8.10, 8.22, 8.23, 8.21 e 8.24).

Ponto E. Rotatória de grama cercada de cimento, rua de asfalto com casas de telha de barro, sem muita areia sobre o asfalto. (figura 8.9).

Ponto F. Ponto de solo exposto, sem construção. (figuras 8.11, 8.12 e 8.14).

Ponto G. Terreno baldio com vegetação rasteira. (figuras 8.13 e 8.16).

Ponto H. Corpo de Bombeiros. (figura 8.15).

Ponto I. Inspetoria Rio Negro, cercada de solo de um lado, grama do outro, e mata ao lado (figuras 8.17, 8.18 e 8.19).



Figura 8: Fotos da área em estudo.

Descrição das fotos indicados na imagem híbrida do satélite IKONOS.

Figura 8.1. Vegetação de mata nativa com o rio negro com águas escuras e a sombra da mata ciliar sobre a água. (7.A)

Todas as imagens híbridas conseguiram identificar estes pontos, sendo possível diferir a sombra das árvores, água, mata e sombra das árvores. A estrada paralela ao rio, também é visível, e de fácil identificação. O ponto de onde foram tiradas as fotografias locais é um morro elevado, o qual não

conseguimos identificar na imagem. A questão de profundidade não foi possível de ser ressaltada;

Figura 8.2. Estrada de saibro ao lado do rio. Pudemos identificar a estrada, mas novamente não identificamos pela imagem que se trata de um corte de morro; (7.A)

Figura 8.3. Curva do rio, com mata, estrada e campos, contendo uma construção ao lado direito da imagem. É possível distinguir detalhes de diferentes tipos de vegetação, como a araucária, uma árvore folhosa, e o campo diferenciado do arbustivo; (7.A)

Figura 8.4. Mata fechada, com diferentes alturas, gerando sombras entre um conjunto e outro, possível identificar pela imagem; (7.B)

Figuras 8.5 e 8.6. Sombra da mata ciliar sobre o Rio Negro, possível de identificação, porém notamos que a área de sombra no dia da visita a campo era maior que o geral nas imagens, e em algumas destas, como a HPF e CPA, existe a fragmentação das sombras, o que não ocorre nas outras imagens híbridas nem na RGB original;(7.B)

Figura 8.7 e 11.8. Área de campos com parte encharcada, contendo árvores isoladas. As árvores, campos e sombras são identificadas nas imagens, bem como ressaltado a diferença nos campos secos e encharcados, pela diferença de tonalidade da cor;(7.C)

Figura 8.9. Rotatória de grama cercada de cimento, rua de asfalto com casas de telha de barro, sem muita areia sobre o asfalto com canteiro central na rua. Foi possível identificar a rotatória, porém o canteiro central não aparece nas imagens. Outro detalhe, que pode ser considerado temporal, é que na imagem, aparece cobertura de areia sobre o asfalto, bem como a presença de

automóveis, e na visita a campo e nas fotos, não é possível identificar o elemento areia. As casas de telhas de barro aparecem em detalhes nas imagens. Elementos como muros e divisórias do terreno, são possíveis de identificação através das sombras dos mesmos;(7.E)

Figura 8.10. Construção com telhado branco com telhas de Eternit, identificado como indústria MAIKO. Bem identificada no terreno e na imagem;(7.D)

Figura 8.11, 8.12 e 8.14. Terreno baldio, de solo exposto, sem construção, com o centro contendo vegetação rasteira e algumas pilastras de concreto. Tanto o solo como a vegetação, são identificados, porém elementos como as pilastras, ou o desnível registrado nestas imagens, não são possíveis de identificação;(7.F)

Figura 8.13 e 8.16. Terreno baldio, com vegetação rasteira uniformemente distribuída, cercada por área construída por todos os lados, com algumas árvores de médio porte ao fundo. A imagem do satélite representa de forma muito precisa esta área, com a delimitação dos muros, ressaltada pela sombra dos mesmos, bem como a diferença entre vegetação, calçamento entre o terreno e o arruamento, e as árvores ao fundo;(7.G)

Figura 8.15. Imagem da edificação do corpo de bombeiros. Foi verificado que o telhado de eternit cinza desta edificação difere de forma bem definida daquele existente na casa em frente, com telhado de barro;(7.H)

Figuras 8.17, 8.18 8.19 e 8.20. Inspetoria Rio Negro. Este é um ponto de grande variedade de coberturas de solo e construções. Trata-se de uma construção relativamente pequena (aproximadamente 40 metros quadrados), contendo uma área de solo descoberto do lado direito, com grama do lado esquerdo. No terreno ao lado, sem separação de muros, encontramos uma área de vegetação rasteira, com aproximadamente 30 cm de altura, e ao fundo uma

vegetação arbustiva, com no máximo 1,5 metros de altura. Todos estes pontos podem ser diferenciados com muita exatidão em todas as imagens;(7.I)

Figura 8.21. Encosta do terreno baldio com solo descoberto dos pontos 11, 12 e 14. Novamente, é possível diferenciação relativa ao tipo de cobertura, neste caso solo descoberto e mato rasteiro, porém, não se identifica o declive existente;(7.D)

Figura 8.22. Vista parcial do telhado da empresa MAIKO, de Eternit branco, que se torna muito visível nas imagens do satélite. A diferença entre a árvore frondosa de grande porte, e o telhado de barro da casa na mesma rua da empresa;(7.D)

Figura 8.23. Frente da Empresa MAIKO, sendo possível identificar toda a parte de descampado à frente da curva do Rio Negro, obtendo uma nítida imagem, da construção, arruamento, campos, rio, mata fechada e sombras.(7.D)

Figura 8.24. Casa de telhado de barro, pintada com tinta protetora, que ressaltava a cor vermelha das telhas. Apesar desta característica ser bem forte no terreno, não foi ressaltada em nenhuma das imagens híbridas, pois se trata do mesmo material, sendo impossível distinguir esta casa das outras com mesmo tipo de cobertura, porém sem o brilho que esta possuía.(7.D).

CAPÍTULO 10 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.

Neste trabalho, foram experimentados métodos de fusão de imagens, e a comprovação dos resultados das fusões aferidos através de classificação e segmentação das imagens; comparativos estatísticos entre as imagens híbridas e as originais, e comprovação destes resultados com visitas a campo.

O método mais simples trabalhado, com menor custo computacional, é o da substituição, apresentando bons resultados, tanto nos dados estatísticos, pois mantém duas das três bandas originais sem alteração das informações espectrais como também na identificação visual de objetos, pois podemos escolher a banda a ser substituída, ressaltando determinados tipos de objetos, como por exemplo, na substituição efetuada neste estudo, ressaltamos a vegetação, pela substituição da banda 2 pela pancromática. Assim podemos ressaltar o uso do solo, arruamento, geologia, dependendo da banda escolhida para substituição.

O custo computacional é baixo, pois necessitamos somente registrar a imagem pancromática à banda a ser substituída, e projetar o conjunto de imagens no canhão RGB de cores, não necessitando processamento de nenhum algoritmo de conversão.

Outro método, que apresenta processamento simples, baseado na conversão entre espaço de cores, mantendo boa qualidade visual, e apresentando bons resultados de classificação é o HSV que apresentou a maior alteração do componente espectral das imagens originais.

Os métodos HSV, HSI e CPA produziram mudanças nos padrões espectrais das regiões de vegetação densa. Também houve diminuição da separabilidade entre ruas, edificações, vegetação rasteira e solos. A análise da correlação indica que a banda 3 foi a mais afetada pelas transformações. Ao fazer a classificação, houve confusão entre edificações e solo, e entre rua e solos. O método HPF manteve maior correlação entre as bandas híbridas e as originais, embora visualmente tenham sido ressaltadas as altas frequências espaciais, o que levou à excessiva segmentação ao efetuar a classificação da imagem.

Para concluir, pode-se considerar que os resultados gerais apresentados pelos métodos anteriormente empregados para os sensores do satélite LANDSAT com menor resolução espacial, podem ser utilizados para os sensores do satélite IKONOS, mas que o nível de detalhamento que este último fornece, abre novos horizontes, antes não possíveis de serem detectados.

A classificação foi efetuada apenas com o intuito de observar a modificação dos valores de pixel e, portanto, da informação espectral, causada pelos métodos de fusão. Com o aumento da resolução espacial e radiométrica, deve-se verificar no processo de classificação a separabilidade das classes com muito mais cuidado. Além disso, o uso de outros elementos, tais como textura, forma, tamanho, orientação, padrão, localização e contexto produzirá uma interpretação mais consistente do que a feita apenas com base nos pixels.

O nível de processamento exigido para estas novas imagens, é muito maior, pois trata de uma quantidade maior de dados a serem processados num tempo menor.

Como trabalhos futuros, os seguintes temas podem ser explorados:

- 1) A melhoria visual e quantitativa das informações obtidas pela fusão de imagens entre a banda pancromática e multiespectral do IKONOS, abrem a possibilidade de estudos de fusão de imagens entre as atuais pancromáticas com resolução de 1 metro com as imagens multiespectrais do LANDSAT com 30 metros, ou mesmo com as imagens do IRS de 10 metros de resolução espacial;
- 2) Estudos de outros métodos de fusão (wavelet);
- 3) Aprofundamento sobre a separabilidade das classes durante a classificação;
- 4) Aplicação de outras máscaras no filtro passa-alta para verificação dos resultados obtidos por Chavez, 1991;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carper, Joseph W., Lillesand, M. T., and Kiefer W. R, 1990. *The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 56, No. 4 April 1990, pp. 459-467.
- Chavez, P. S., Jr., Stuart C. Sides, and Jeffrey A. Anderson. *Comparasion of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 57, No. 3 March 1991, pp. 295-303.
- Chavez, S. Jr. *Comparison of the Spectral Information Content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for Thre Different Sites in the Phoenix, Arizona Region*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 54, No. 12 December 1988, pp. 1699-1708.
- Chavez, S. Jr., *Digital Merging of Landsat 7 and Digitized NHAP Data for 1:24.000 Scale Image Mapping*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 52, No. 10 October 1986, pp. 1637-1646.
- Cliché, G., Bonn, F. 1985, *Integration of the SPOT Panchromatic Channel into its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 51, No. 3 March 1985, pp. 311-316.
- Crosta, A. Penteado., *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Editora rev – Campinas, 1993.
- DFC, *Remote Sensing Data Fusion Research and Technology Development*. the Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Inc. , The Data Fusion Technical Committee, Version 1, Revision 5, February 2001.
- Dillon, W.; Goldestein, M. *Multivariate Analysis and Methods and Applications*. NewYork: John Wiley & Sons, 1984.
- Gonzalez, Rafael C., Woods, Richard E. *Processamento de Imagens Digitais*. Editora Edgard Blucher Ltda, 2000.

- Guarguet-Duport, Bruno, Girel Jacky, Chassery Jean-Marc, and Pautou Guy, 1996. *The Use of Multiresolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9 September 1996, pp. 1057-1066.
- Jensen, R. John. *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall, 1994.
- Kruse and Raines, *A technique for enhancing digital color images by contrast, stretching in Munsell color space*, in Proceedings of the ERIM Third Thematic Conference, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, 1994: pg. 755-760.)
- Munehika, Curtis K., Warnick, James S., Salvaggio Carl, and Schott, John R., 1993. *Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No. 1 January 1993, pp. 67-72.
- Novo, Evelyn M.L.M.. *Sensoriamento Remoto*, Ed. Edgard Blücher Ltda, 2ª ed., São Paulo - SP, 1993.
- Oliveira, B. N. Hermes. *Segmentação e Classificação de Imagens LANDSAT-TM*. Dissertação de mestrado, UFPR, 1999.
- Parker, J. R. *Algorithms For Image Processing and Computer Vision*. Wiley Computer Publishing,
- Passos, C. P. Antonio e Markus, F. Flavia. *Avaliação da aplicabilidade de imagem de alta resolução para o cadastro técnico Municipal*. UFPR, 2001.
- Pohl, C. *Tools and Methods for fusion of images of different spatial resolution*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June, 1999.
- Richards, John A., *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- Schowengerdt, R. A., *Reconstruction of Multispatial, Multispectral Image Data Using Spatial Frequency Content*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 46, No. 10 October 1980, pp. 1325-1334.

Wald, L., Rachin T., and Mangolini M., 1997. *Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of resulting Images*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 6 June 1997, pp. 691-699.

Yocky, David A., *Multiresolution Wavelet Decomposition Image Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9 September 1996, pp. 1067-1074.

ANEXO A.

Menu de chamada dos programas elaborados para processamento de imagens de 11 bits do IKONOS no software ENVI 3.2

```
0 {Mestrado}
  1 {versão 1.1}
    2 {Processo total} {processo_total} {processo_total}
    2 {Concatena bandas} {concat_bandas} {concat_bandas}
    2 {Concatena arquivos} {concat_arq} {concat_arq}
    2 {Copia bandas} {copia_bandas} {copia_bandas}
    2 {Subtrai atmosfera} {subtrai_atmosfera} {sub_atmosfera}
    2 {Fusao SUB} {Fusao por substituição de bandas} {Fusao_sub}
    2 {Fusao HSI} {Fusao pelo método Hue Saturation Intensity} {Fusao_hsi}
    2 {Fusao HPF} {Fusao pelo método High Pass Filter} {Fusao_hpf}
    2 {Fusao CPA} {Fusao pelo método das componentes principais} {Fusao_CPA}
    2 {Gera estatística} {estat_arq} {estat_arq}
    2 {Visualizar Arquivo de Estatística} {view_stats} {envi_stats_event}
    2 {Estatísticas batch} {batch_stats} {btm_stat}
  1 {versão 1.2}
    2 {filtro Passa Alta} {sobel_ps} {sobel_ps}
    2 {fusao hsv munsell} {usgs munsell hsv} {munsell}
    2 {fusao inversa hsv munsell} {usgs munsell rgb} {munsell}
    2 {fusao HSI} {HSI HSI} {hsi}
    2 {fusao inversa HSI} {HSI RGB} {hsi}
    2 {fusao CPA} {RGB CPA} {CPA}
    2 {equaliza histograma} {equaliza_histograma} {equaliza_histograma}
```

Trecho de código para conversão RGB para HSV

```
;Constantes do usuário
k2 = sqrt(2) / 2.0
k6 = sqrt(6) / 6.0
k3 = sqrt(3) / 3.0
k7 = sqrt(6) / 3.0

; Calcula as coordenada Munsell, hue, val e sat

b1 = ((k7 * blu) - (k6 * gm) - (k6 * red))
x1 = (k2 * gm) - (k2 * red)

val = k3 * (temporary(red) + temporary(gm) + temporary(blue))
sat = sqrt(b1^2 + x1^2)
hue = atan(temporary(x1), temporary(b1)) * (180. / !pi)
```

```

; Ajuste das faixas dos dados
ptr = where(hue lt 0, count)
if(count gt 0) then hue(ptr) = hue(ptr) + 360.

```

```

ptr = where(sat lt .000001, count)
if (count gt 0) then hue(ptr) = 400.

```

Trecho de código para conversão HSV para RGB

```

; Constantes do usuário

```

```

k2 = sqrt(2) / 2.0
k6 = sqrt(6) / 6.0
k3 = sqrt(3) / 3.0
k7 = sqrt(6) / 3.0

```

```

hue=float(envi_get_tile(tile_id1,i,ys=ys,ye=ye))
sat=float(envi_get_tile(tile_id2,i))
val=float(envi_get_tile(tile_id3,i))

```

```

; Calcula as coordenada RGB

```

```

hue = temporary(hue) * (!pi/180.)
b1 = sat * cos(hue)
x1 = sat * sin(hue)

```

```

red = float(k3 * val - k2 * x1 - k6 * b1)
grn = float(k2 * x1 + k3 * val - k6 * b1)
blu = float(k7 * b1 + k3 * val)

```

```

; Clip to 0 and 255 and convert to byte

```

```

red = fix((red > 0) < 2048)
grn = fix((grn > 0) < 2048)
blu = fix((blu > 0) < 2048)

```

Trecho de código para fusão HSI

```

sharpen_doit, fid=[fid, fid, fid], pos=pos, f_fid=f_fid, method=0, $
f_pos=f_pos, f_dims=f_dims, interp=0, out_name=out_name, $
r_fid=r_fid
;end

```

```

envi_stats_doit, fid=r_fid, pos=pos, dims=dims, dmin=dmin, $
dmax=dmax, mean=mean, stdv=stdv, cov=cov, evec=evec, eval=eval, $
comp_flag=4, report_flag=5, to_screen=1, rep_name=rep_out_name

```

end

Trecho de código para efetuar fusão pelo método CPA

```
envi_check_save, /transform
pc_rotate, fid=c_fid, pos=pos, out_name=out_name, $
out_dt=4, out_nb=nb, $
in_memory=0, mean=mean, evec=evec, eval=eval, dims=dims, $
r_fid=r_fid
;end
envi_stats_doit, fid=r_fid, pos=pos, dims=dims, dmin=dmin, $
dmax=dmax, mean=mean, stdv=stdv, cov=cov, evec=evec, eval=eval, $
comp_flag=4, report_flag=5, to_screen=1, rep_name=rep_out_name
end
```

Trecho de código para fusão HPF

```
; executa filtro passa alta sobre a imagem de melhor resolução espacial.
conv_doit, fid=fid, pos=pos, dims=dims, method=8, /in_memory, $
add_back=0.00, kx=3, ky=3, out_dt=data_type, r_fid=r_fid, $
kernel=kernel, scale_fac=scale_fac

expr = '((float(b1)/2)+(float(b2)/2))'

math_doit, fid=[f_fid, r_fid], pos=pos, dims=dims, out_name=out_name, $
in_memory=0, exp=expr, r_fid=o_fid
```