

**unesp**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**

---

**ANDERSON DE FREITAS BARROS**

**ANÁLISE DISCRIMINATÓRIA DE ALVOS DA PAISAGEM URBANA**  
**EM IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS**

**Presidente Prudente**

**2010**

**ANDERSON DE FREITAS BARROS**

**ANÁLISE DISCRIMINATÓRIA DE ALVOS DA PAISAGEM URBANA EM  
IMAGENS AÉREAS MULTIESPECTRAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai

Co-orientador: Prof. Dr. Airton Marco Polidorio

**Presidente Prudente**

2010

Barros, Anderson de Freitas.  
B273a      Análise discriminatória de alvos da paisagem urbana em imagens  
aéreas multiespectrais / Anderson de Freitas Barros. - Presidente  
Prudente : [s.n], 2010  
xv, 91 f. : il.

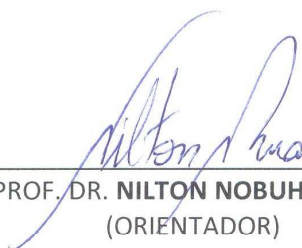
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Orientador: Nilton Nabuhiro Imai  
Co-orientador: Airton Marco Polidório  
Banca: Antonio Maria Garcia Tommaselli, Daniel Rodrigues dos  
Santos  
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Processamento  
de Imagem. 4. Índice de Realce. 5. Correção de Vinhete. I. Autor. II.  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia.  
III. Título.

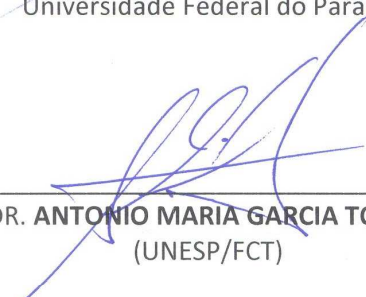
CDD 623.72

**Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da  
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de  
Presidente Prudente.**

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. **NILTON NOBUHIRO IMAI**  
(ORIENTADOR)

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. **DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS**  
Universidade Federal do Paraná

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. **ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI**  
(UNESP/FCT)

  
\_\_\_\_\_  
ANDERSON DE FREITAS BARROS

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 29 DE NOVEMBRO DE 2010

RESULTADO: APROVADO

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais, Joseja (em memória) e Valderi,  
por minha existência.  
À Andreia, Fabiano e Mônica,  
pelo incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

É com muita satisfação que agradeço:

À minha família pelo amor, carinho e apoio;

Ao Prof. Nilton Nobuhiro Imai pela orientação, dedicação, incentivo e apoio no desenvolvimento desse trabalho e principalmente, pela confiança depositada em mim;

Ao Prof. Airton Marco Polidório pela orientação e incentivo;

Ao Prof. Amorim pela orientação no estágio docência;

Aos membros da banca de qualificação, Prof. Antonio Maria Garcia Tommaselli e Prof.<sup>a</sup> Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo, pelas sugestões e apontamentos;

Aos membros da banca de defesa de dissertação; Prof. Daniel Rodrigues dos Santos, por aceitar gentilmente participar da banca e oferecer contribuições; e ao Prof. Antonio Maria Garcia Tommaselli, por aceitar mais uma vez participar da banca e oferecer contribuições ao trabalho;

Aos colegas e amigos, Thiago Samizava, Fernanda Prado, Juliano, German, Oscar, Cristina, Fábio, Carlos, Adilson, Rodrigo Paulista, Gaúcho, Juliana Miyoshi, Maria Lígia, Fernanda Puga, Haroldo, Tatiana, Lauriana, João Paulo, Marcelo Solfa, Ligia Manccini, pelo apoio e troca de conhecimento;

Ao Rafael, Cláudio, Gilberto, Erick, pelo apoio, bate-papo e principalmente, por serem grandes amigos;

A UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, em especial, aos professores das disciplinas cursadas ao longo do mestrado;

Aos funcionários, em especial, à dona Cícera, Erynat, Ivonete e Márcia;

A CAPES pela bolsa de mestrado;

Enfim, a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram com esse trabalho.

## RESUMO

O reconhecimento de padrões de alvos específicos presentes na paisagem urbana como telhados de edificações as quais não são padronizados, ou seja, possuem variadas formas geométricas, dimensões, cores e texturas não é uma tarefa simples devido à alta complexidade desses alvos. Detectar e discriminar esses alvos constitui tarefa fundamental nos processos de mapeamento baseados em análise de imagem. Entretanto, graças aos avanços tecnológicos incorporados às câmaras fotogramétricas digitais, tem-se percebido um aumento contínuo da resolução espectral. Isso torna possível adquirir imagens com maior potencial para a discriminação devido aos atributos espectrais. Como alternativa de sistema de aerolevante, foi desenvolvido o Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais (SAAPI) o qual é capaz de adquirir imagens aéreas multiespectrais com alta resolução espacial. O SAAPI é composto por sensores de quadro capazes de produzir imagens multiespectrais com características de flexibilidade, confiabilidade e baixo custo. Mas, esses dados espectrais devem ser avaliados em aplicações de reconhecimento de padrões para aprimorar sua utilização. Nesse contexto, este trabalho busca ajustar índices de realce para serem capazes de destacar alvos específicos como corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação presentes na paisagem urbana registrados em imagens adquiridas pelo SAAPI. Também, foi desenvolvida uma abordagem para correção do efeito vinhete baseada na análise de superfície de tendência da resposta radiométrica de sombras. Os resultados obtidos foram satisfatórios e confirmaram que as abordagens desenvolvidas podem ser aplicadas em mapeamento de áreas urbanas para reconhecer e identificar alvos específicos nas imagens adquiridas pelo SAAPI. A análise de superfície de tendência aplicada para modelar o efeito vinhete foi aplicada com base nos componentes R, G, B da imagem, bem como na componente I derivada das componentes básicas R, G, B da imagem. O modelo de correção do efeito vinhete baseado nas variações da componente I produziu resultado capaz de minimizar o efeito vinhete melhor do que a correção baseada nas componentes originais.

**Palavras-chave:** Reconhecimento de Alvos Urbanos, Processamento de Imagem, Realce de Alvos Urbanos, Correção de Vinhete.

## **ABSTRACT**

Pattern recognition of specific targets in the urban scenery is not a simple task due to its high complexity. Recognizing building roofs, per example, has very variable features like geometrical form, dimension, color and texture. Detection and discrimination of these targets are basic tasks in mapping processes which are based on image analysis. Technological advancements of digital cameras have helped to improve the continuous increase of spectral resolution. Consequently, it allows the acquisition of aerial image data with higher potential for target discrimination based on spectral response. As an alternative to areal surveying system, it was developed the Lightweight Airborne Image Acquisition System (SAAPI) in order to survey high resolution areal-based multispectral images. The SAAPI is made-up of sensors to produce multispectral images with characteristics of flexibility, reliability and low cost. However, these spectral data must be evaluated for pattern recognition applications. Thus, this research intends to adjust enhancement indexes to detection of specific targets in the urban scenery, like water, shadow, paved roads and vegetation in images taken through the SAAPI. It was also developed an approach for correcting the vignetting effect based on the trend surface analysis of shadow radiometric response. The findings are satisfactory and validate the use of the developed approach in urban areas mapping to recognize and identify specific targets, based on SAAPI images. Another finding is that an approach based on intensity component can minimize the vignetting effect better than the one based on the image basic color components R, G, B.

**Keywords:** Urban Target Recognition, Image Processing, Urban Feature Enhancement, Vignetting Correction.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 01. Espectro eletromagnético.                                                   | 20 |
| Figura 02. Trajetórias de energia em um sistema de sensoriamento remoto.               | 23 |
| Figura 03. Curvas espectrais de solos com diferentes porcentagens de água.             | 24 |
| Figura 04. Curvas de refletância da água nos estados líquido, gasoso e sólido.         | 25 |
| Figura 05. Comportamento espectral do concreto e do asfalto.                           | 26 |
| Figura 06. Limiarização global.                                                        | 31 |
| Figura 07. Efeito da erosão e da dilatação na imagem.                                  | 34 |
| Figura 08. Efeito da abertura e do fechamento na imagem.                               | 35 |
| Figura 09. Representação do sistema sensor câmara de quadro.                           | 37 |
| Figura 10. Estrutura do SAAPI.                                                         | 38 |
| Figura 11. Variação da iluminação ao longo do plano negativo devido ao efeito vinhete. | 40 |
| Figura 12. Comportamento espacial de variáveis dependentes.                            | 42 |
| Figura 13. Área de estudo Tarumã.                                                      | 49 |
| Figura 14 . Área de estudo Presidente Prudente.                                        | 50 |
| Figura 15. Análise do efeito vinhete.                                                  | 67 |
| Figura 16. Correção do efeito vinhete na primeira estratégia.                          | 74 |
| Figura 17. Análise da correção do efeito vinhete na primeira estratégia.               | 75 |
| Figura 18. Correção do efeito vinhete na segunda estratégia.                           | 75 |
| Figura 19. Análise da correção do efeito vinhete na segunda estratégia.                | 76 |
| Figura 20. Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste.            | 78 |
| Figura 21. Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste.            | 78 |
| Figura 22. Macrófitas no corpo d'água.                                                 | 79 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23. Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. | 80 |
| Figura 24. Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos com ajuste. | 80 |
| Figura 25. Visualização ampliada sobre a sombra de vegetação.               | 84 |
| Figura 26. Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. | 86 |
| Figura 27. Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos com ajuste. | 86 |
| Figura 28. Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. | 87 |
| Figura 29. Imagem obtida pela equação $NDVI + WWI + NIR$ .                  | 88 |
| Figura 30. Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste. | 89 |
| Figura 31. Regiões escolhidas para verificar a qualidade dos resultados.    | 89 |
| Figura 32. Identificação de corpo d'água.                                   | 93 |
| Figura 33. Identificação de sombra.                                         | 94 |
| Figura 34. Identificação de via pavimentada.                                | 95 |
| Figura 35. Identificação de vegetação.                                      | 96 |
| Figura 36. Análise visual na identificação de sombra.                       | 97 |
| Figura 37. Análise visual na identificação de vegetação.                    | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 01. Opções de coleta do SAAPI.                                           | 39 |
| Tabela 02. Análise da variância para a escolha do melhor polinômio              | 43 |
| Tabela 03. Valor do coeficiente kappa associado ao desempenho da classificação. | 46 |
| Tabela 04. Matriz de confusão.                                                  | 65 |
| Tabela 05. Validação dos polinômios dos componentes R, G, B e I.                | 67 |
| Tabela 06. Escolha do melhor polinômio do componente R.                         | 69 |
| Tabela 07. Escolha do melhor polinômio do componente G.                         | 70 |
| Tabela 08. Escolha do melhor polinômio do componente B.                         | 71 |
| Tabela 09. Escolha do melhor polinômio do componente I.                         | 72 |
| Tabela 10. Coeficientes e polinômio dos componentes R, G, B e I.                | 73 |
| Tabela 11. Alvos e suas respostas nos componentes NDVI, NIR, nSI e sSI.         | 82 |
| Tabela 12. Valores de $(\min(nSI, sSI) - NIR)$ dos elementos amostrais.         | 83 |
| Tabela 13. Matriz de confusão (sombra).                                         | 90 |
| Tabela 14. Matriz de confusão (via pavimentada).                                | 90 |
| Tabela 15. Matriz de confusão (vegetação).                                      | 90 |
| Tabela 16. Matriz de confusão (corpo d'água).                                   | 90 |
| Tabela 17. Valores da exatidão global e do coeficiente <i>kappa</i> dos alvos.  | 90 |

## LISTA DE SIGLAS

|                  |                                                                                       |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| A/D              | Analógico/Digital                                                                     |
| CCD              | Charge Coupled Device (dispositivo de carga acoplada)                                 |
| CMOS             | Complementary Metal Oxide Semiconductor (semicondutor metal-óxido complementar)       |
| ENGEMAP          | Empresa Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento Ltda.                               |
| GPS              | Global Positioning System (sistema de posicionamento global)                          |
| HSI              | Hue, Saturation, Intensity (tom, saturação, intensidade)                              |
| MMQ              | Método dos Mínimos Quadrados                                                          |
| mWI              | maximum Water Index (índice máximo de água)                                           |
| ND               | Número Digital ou Nível de Cinza                                                      |
| NDVI             | Normalized Difference Vegetation Index (índice de vegetação da diferença normalizada) |
| NIR              | Near Infrared (infravermelho próximo)                                                 |
| nRI              | normalized Road Index (índice normalizado de rodovia)                                 |
| nSI              | normalized Shadow Index (índice normalizado de sombra)                                |
| RGB              | Red, Green, Blue (vermelho, verde, azul)                                              |
| RWSI             | Road-Water-Shadow Index (índice de sombra-água-rodovia)                               |
| SAAPI            | Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais         |
| sSI              | spectral Shadow Index (índice espectral de sombra)                                    |
| UNESP            | Universidade Estadual Paulista                                                        |
| WWI              | Weighted Water Index (índice ponderado de água)                                       |
| GSD              | Ground Sample Distance (elemento de resolução no terreno)                             |
| GFOV             | Ground-projected Field Of View (campo de visada projetado no terreno)                 |
| Z <sup>*,+</sup> | Números inteiros, não negativos e não nulos                                           |

## SUMÁRIO

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                              | 15 |
| 1.1    Hipótese .....                                                           | 16 |
| 1.2    Objetivo .....                                                           | 16 |
| 1.3    Justificativas .....                                                     | 17 |
| 1.4    Estrutura do trabalho .....                                              | 17 |
| 2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO AMBIENTE URBANO.....                        | 19 |
| 2.1    Espectro eletromagnético e mecanismos de interação energia-matéria ..... | 19 |
| 2.2    Comportamento espectral de alvos urbanos .....                           | 22 |
| 2.3    Índices de realce utilizados e propostos por Polidorio (2007) .....      | 26 |
| 2.4    Função de transformação de dimensão.....                                 | 29 |
| 2.5    Limiarização .....                                                       | 31 |
| 2.6    Morfologia matemática.....                                               | 32 |
| 2.7    Sistema sensor câmara de quadro.....                                     | 36 |
| 2.8    SAAPI.....                                                               | 37 |
| 2.9    Efeito Vinhete.....                                                      | 40 |
| 2.10    Correção do Efeito Vinhete .....                                        | 41 |
| 2.11    Análise de superfície de tendência .....                                | 41 |
| 2.12    Avaliação da qualidade do resultado da identificação de alvos .....     | 45 |
| 3. MATERIAL E MÉTODO.....                                                       | 47 |
| 3.1    Material.....                                                            | 47 |
| 3.2    Características das imagens aéreas .....                                 | 48 |
| 3.3    Áreas de estudo.....                                                     | 48 |

|       |                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4   | Metodologia.....                                                                       | 50  |
| 3.4.1 | Seleção da área de estudo .....                                                        | 50  |
| 3.4.2 | Pré-processamento da imagem .....                                                      | 51  |
| 4.    | DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO .....                                                     | 53  |
| 4.1   | Abordagem para correção do efeito vinhete.....                                         | 54  |
| 4.2   | Identificação de alvos em imagens do espectro do visível e do infravermelho .....      | 55  |
| 4.2.1 | Corpo d'água .....                                                                     | 55  |
| 4.2.2 | Sombra.....                                                                            | 59  |
| 4.2.3 | Via pavimentada.....                                                                   | 60  |
| 4.2.4 | Vegetação .....                                                                        | 63  |
| 4.2.5 | Verificação da qualidade do resultado da identificação de alvos.....                   | 65  |
| 5.    | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                           | 66  |
| 5.1   | Análise do resultado da correção do efeito vinhete .....                               | 66  |
| 5.2   | Análise e ajuste do resultado da identificação da área de estudo Tarumã.....           | 76  |
| 5.2.1 | Análise estatística da qualidade do resultado da área de estudo Tarumã .....           | 89  |
| 5.3   | Análise e ajuste do resultado da identificação da área de estudo Presidente Prudente.. | 91  |
| 5.3.1 | Análise visual da qualidade do resultado da área de estudo Presidente Prudente .       | 96  |
| 6.    | CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....                                             | 98  |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                      | 103 |
|       | ANEXO A – Distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade.....       | 106 |

## 1 INTRODUÇÃO

Produtos de levantamentos aerofotogramétricos realizados com câmaras fotogramétricas digitais capazes de tomar imagens multiespectrais tornam possível o aprimoramento dos processos de reconhecimento de padrões de imagens aéreas com a incorporação da análise da resposta espectral dos alvos de interesse. A análise da resposta espectral para essa finalidade é uma abordagem adotada para produtos oriundos de sensores orbitais. Portanto, os atributos espectrais podem oferecer um conteúdo de informação que pode contribuir para o desenvolvimento de processos automáticos de mapeamento de alvos da área urbana.

No que se refere à paisagem urbana, o reconhecimento de padrões dos alvos específicos desse ambiente em imagens aéreas não é uma tarefa simples devido à alta complexidade como, por exemplo, identificar telhados de edificações que não são padronizados (forma geométrica, dimensão, cor e textura). Detectar e discriminar esses alvos constitui uma tarefa fundamental para automatizar os processos de mapeamento baseados em análise de imagem.

No contexto de reconhecimento de padrões de alvos específicos da paisagem urbana, Polidório (2007) propôs o uso de índices capazes de realçar a presença de alguns alvos dessa paisagem em imagens multiespectrais.

No trabalho de Polidório (2007) foram utilizadas várias imagens multiespectrais aéreas, algumas ortorretificadas, adquiridas em diferentes regiões e por diferentes sensores, dos quais alguns arranjados em diferentes ângulos de visada.

Como alternativa de sistema de aerolevantamento, foi desenvolvido o Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais (SAAPI), numa parceria entre a Universidade Estadual Paulista (UNESP) e a Empresa Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento Ltda. (ENGEMAP). O resultado desse projeto é um sistema capaz de gerar imagem aérea multiespectral com alta resolução espacial. Nesse caso, essas imagens devem ser tomadas com um GSD (dimensão do elemento amostral no terreno) que permita amostrar os alvos urbanos como as edificações, as vias urbanas, os passeios públicos,

entre outros elementos dessa paisagem de forma que sejam visivelmente distinguidos num processo de restituição fotogramétrica.

O SAAPI é composto por sensores de quadro capazes de produzir imagens multiespectrais com características de flexibilidade, confiabilidade e baixo custo. Entretanto, esses dados espectrais devem ser avaliados em aplicações de reconhecimento de padrões, detecção e discriminação de alvos.

Durante o processo de aquisição de imagens digitais podem ocorrer variações nos valores de brilho em função da distância do ponto ao centro da imagem, que causam um efeito radial de escurecimento da imagem conhecido como efeito vinhete (LILLESAND e KIEFER, 1987). Portanto, é necessário realizar a correção do efeito vinhete para se ter uma uniformização de brilho na imagem.

Sendo assim, esse trabalho busca desenvolver uma abordagem para corrigir o efeito vinhete baseado na análise de superfície de tendência dos valores do número digital (ND) registrado das sombras de uma cena. A abordagem, aplicada aos componentes R, G, B e I das sombras, utiliza a regressão pelos mínimos quadrados como método para o ajuste da superfície aos dados dos componentes. Além disso, os índices de realce e algoritmos de limiarização propostos por Polidório (2007) foram ajustados para tornarem-se capazes de realçar e identificar alvos específicos como corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação presentes na paisagem urbana registrados em imagens aéreas de alta resolução espacial, adquiridas com o SAAPI.

## **1.1 Hipótese**

Como hipótese admite-se que as abordagens propostas por Polidório (2007) podem reconhecer alvos específicos presentes nas imagens adquiridas por câmaras digitais comerciais que operam nas faixas do espectro do visível e do infravermelho próximo.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo do trabalho é propor uma metodologia de processamento das imagens multiespectrais adquiridas por câmaras digitais comerciais para detecção e discriminação de alvos específicos em imagens aéreas de regiões urbanas.

Nesse contexto, deverão ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

a) Desenvolver uma abordagem de correção do efeito vinhete por ajuste de função polinomial utilizando dados de sombra.

b) Adaptar métodos propostos por Polidório (2007) para serem capazes de realçar alvos específicos como corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação nas imagens multiespectrais de alta resolução espacial tomadas por câmaras digitais comerciais.

c) Avaliar imagens multiespectrais tomadas por câmaras digitais comerciais para o mapeamento automático de alvos urbanos com base na abordagem de Polidório (2007).

### **1.3 Justificativas**

A metodologia de identificação de alvos urbanos em imagens multiespectrais de alta resolução desenvolvida por Polidório (2007) ainda não foi avaliada para o caso de imagens multiespectrais tomadas de câmaras digitais comerciais.

Outra justificativa é que câmaras digitais comerciais são sensores de menor custo e podem ser adaptadas para tomar imagens multiespectrais.

E, finalmente, a correção do efeito vinhete pela análise de superfície de tendência com base nas informações oferecidas pelas sombras ainda não foi avaliada.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

Esse trabalho está organizado em seis capítulos principais.

O primeiro capítulo apresenta as considerações iniciais, a hipótese, o objetivo e em seguida, as justificativas.

O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica de alguns pontos importantes sobre Sensoriamento Remoto Aplicado ao Ambiente Urbano.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nesse trabalho para atingir os objetivos definidos.

O quarto capítulo trata dos detalhes da abordagem para correção do efeito vinhete e dos procedimentos para identificar os alvos específicos.

O quinto capítulo apresenta os resultados produzidos e as discussões acerca dos resultados.

O sexto capítulo trata das considerações finais, das propostas de aprimoramento e das recomendações para o desenvolvimento de soluções de problemas relacionados ao contexto desse trabalho.

## **2 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO AMBIENTE URBANO**

No que se refere ao ambiente urbano, frequentemente, os profissionais, cientistas e instituições públicas demandam informações atualizadas sobre a infraestrutura urbana para o estudo do crescimento urbano (JENSEN, 2009).

Jensen (2009) acrescenta que deve ser considerada a análise multitemporal para o monitoramento de ambientes urbanos com o uso de dados de sensores remotos.

O mesmo autor afirma que o ambiente urbano é composto por um conjunto diversificado de materiais (concreto, asfalto, madeira, água, vegetação arbustiva, árvore, solo, etc.) dispostos de maneira complexa na superfície terrestre.

Por fim, para o estudo do ambiente urbano, o usuário poderá utilizar imagens aéreas ou outras formas de dados de sensores remotos para extrair a informação urbana requerida.

### **2.1 Espectro eletromagnético e mecanismos de interação energia-matéria**

O Sol é a principal fonte de energia eletromagnética disponível para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. Ele produz um espectro contínuo de energia, que chega à Terra, desde os raios gama até as ondas de rádio.

A Figura 01 apresenta o espectro eletromagnético e dá ênfase à porção visível do espectro que vai da faixa limite do violeta até o limite do vermelho.

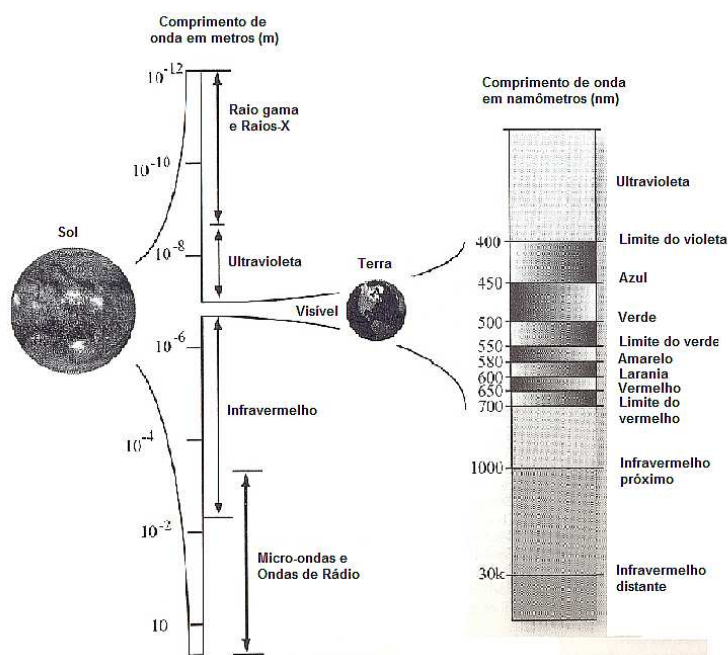


Figura 01. Espectro eletromagnético.

Fonte: adaptada de Jensen (2009).

Segundo Jensen (2009), a radiação eletromagnética pode sofrer alterações na velocidade de radiação, no comprimento de onda, na intensidade e na distribuição espectral ao alcançar a atmosfera. Essas alterações sofridas pela radiação eletromagnética na atmosfera são resultados das interações de refração, espalhamento, absorção e refletância.

O mesmo autor define essas interações da seguinte maneira:

A refração refere-se ao desvio da luz quando ela passa de um meio a outro meio de densidade diferente, isto ocorre, pois os meios são diferentes em densidade e a velocidade da radiação eletromagnética é diferente em cada um deles. [...] O espalhamento difere da refração no sentido de que a direção associada ao espalhamento é imprevisível, resulta da obstrução da radiação eletromagnética por partículas existentes na atmosfera e há 3 tipos de espalhamentos (Rayleigh, Mie e Não-seletivo). [...] A absorção é o processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia. [...] A refletância é o processo no qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de nuvem, corpo d’água ou solo exposto. (JENSEN, 2009).

Ao alcançar um objeto na superfície terrestre, a radiação eletromagnética interage de acordo com as características do sinal e do objeto. Nesse contexto, Novo (1989) afirma que quando as ondas eletromagnéticas interceptam um objeto ocorre um processo de transferência de energia da radiação para o objeto, porém o resultado da interação depende das propriedades elétricas e magnéticas do material.

Como resultado da interação entre a radiação eletromagnética e o objeto na superfície terrestre, uma parte da energia incidente é refletida, outra é absorvida, e outra porção é transmitida.

As definições de refletância, transmitância e absortância são apresentadas no trecho a seguir:

A refletância ( $\rho_\lambda$ ) é definida como a razão adimensional entre o fluxo radiante refletido ( $\phi_{\text{refletido}_\lambda}$ ) por uma superfície e o fluxo radiante incidente ( $\phi_{i_\lambda}$ ) nela. [...] A transmitância ( $\tau_\lambda$ ) é definida como a razão adimensional entre o fluxo radiante transmitido ( $\phi_{\text{transmitido}_\lambda}$ ) por uma superfície e o fluxo radiante incidente ( $\phi_{i_\lambda}$ ) nela. [...] A absortância ( $\alpha_\lambda$ ) é definida como a razão adimensional entre o fluxo radiante absorvido ( $\phi_{\text{absorvido}_\lambda}$ ) por uma superfície e o fluxo incidente ( $\phi_{i_\lambda}$ ) nela. (JENSEN, 2009).

Para Jensen (2009), a equação do balanço de radiação estabelecida pela quantidade total de fluxo radiante em comprimentos de onda específicos ( $\lambda$ ) incidente no terreno ( $\phi_{i_\lambda}$ ) deve ser balanceada pela quantidade de fluxo radiante refletido pela superfície ( $\phi_{\text{refletido}_\lambda}$ ), quantidade de fluxo radiante absorvido pela superfície ( $\phi_{\text{absorvido}_\lambda}$ ) e quantidade de fluxo radiante transmitido pela superfície ( $\phi_{\text{transmitido}_\lambda}$ ). A formulação do balanço de radiação é a seguinte:

$$\phi_{i_\lambda} = \phi_{\text{refletido}_\lambda} + \phi_{\text{absorvido}_\lambda} + \phi_{\text{transmitido}_\lambda} \quad (01)$$

No entanto, as grandezas refletância, transmitância e absortância não fornecem a quantidade exata de energia que atinge uma área específica no terreno proveniente de uma direção específica ou a quantidade exata de fluxo radiante que emerge do terreno numa certa direção (JENSEN, 2009).

Novo (1989) afirma que em sensoriamento remoto o que é medido é o fluxo radiante que deixa a superfície terrestre em direção ao sensor, e conseqüentemente, a grandeza medida frequentemente é a radiância ( $L_\lambda$ ) do alvo.

Jensen (2009) afirma que a radiância é a medida radiométrica mais precisa em sensoriamento remoto e a define como a intensidade radiante ( $\phi_\lambda$ ) por unidade de área-fonte ( $A$ ) projetada numa direção específica ( $\cos \theta$ ) e num ângulo sólido ( $\Omega$ ). A formulação da radiância é a seguinte:

$$L_{\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}}{A \cdot \cos \theta \cdot \Omega} \quad (02)$$

O fluxo radiante refletido ou emitido da superfície terrestre entra novamente na atmosfera, onde acontecem as interações com gases, vapor d'água e partículas em suspensão. Dessa forma, novamente, o espalhamento, a absorção, a reflexão e a refração influenciam o fluxo radiante antes que a energia seja registrada pelo sistema de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009).

## 2.2 Comportamento espectral de alvos urbanos

Para extrair informações dos alvos na superfície terrestre nos dados de sensoriamento remoto é importante conhecer o comportamento espectral desses alvos (NOVO, 1989). Para Jensen (2009), é possível obter informações importantes sobre o terreno ao analisar o fluxo radiante que chega (incidente) em diferentes comprimentos de onda e como ele interage com o terreno.

Segundo Novo (1989), além de extrair informações dos alvos na superfície terrestre, o conhecimento do comportamento espectral de alvos é também importante na definição de novos sensores, na definição do tipo de processamento a que devem ser submetidos os dados brutos ou mesmo na definição da forma de aquisição desses dados.

No ambiente urbano, o alvo é formado por diferentes materiais e está inserido num contexto ambiental rico em objetos adjacentes como, por exemplo, árvores, prédios, água, asfalto, solo exposto entre outros (JENSEN, 2009).

Segundo Jensen (2009), a resposta espectral do alvo recebe influência dos seguintes fatores: relação geométrica entre a energia incidente e o ângulo de visada do sensor, efeitos atmosféricos e propriedades físicas dos materiais estudados. O autor acrescenta que aliados a esses fatores, os objetos adjacentes contribuem na medida do fator de refletância do alvo de interesse.

Nesse contexto, Novo (1989) informa que os alvos sofrem interferências múltiplas, quer oriundas dos objetos adjacentes, quer oriundas do próprio dinamismo interno de suas características; e com isso, a energia espalhada pela vizinhança do alvo pode ter um

conteúdo espectral diferente daquele do alvo de interesse e mascarar a resposta espectral do alvo.

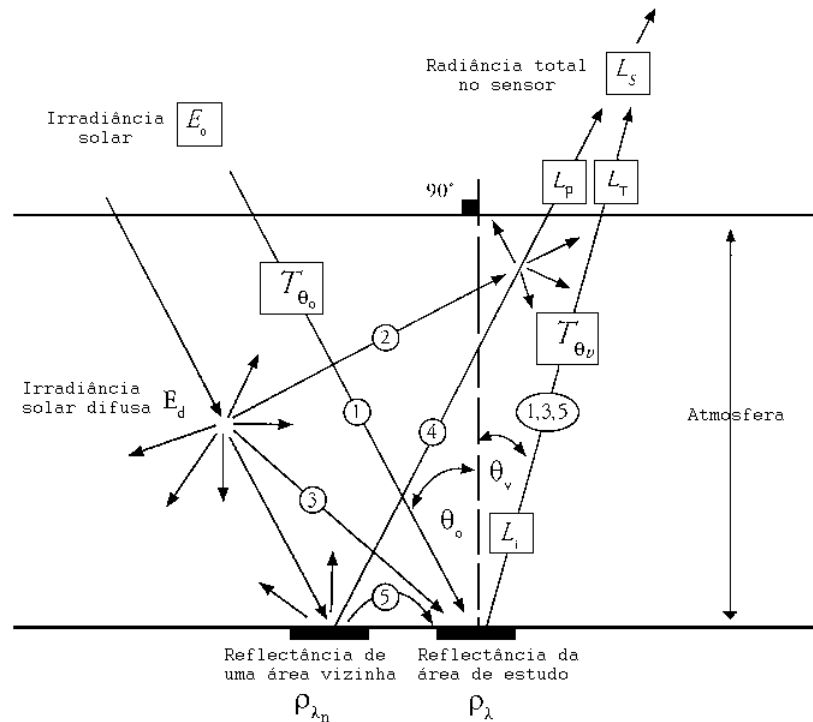


Figura 02. Trajetórias de energia em um sistema de sensoriamento remoto.

Fonte: adaptada de Jensen (2009).

A Figura 02 apresenta as trajetórias de energia em um sistema de sensoriamento remoto. Segundo Jensen (2009),  $T_\theta$  é a transmitância atmosférica num ângulo  $\theta$  com o zênite,  $\theta_o$  é o ângulo zenital solar,  $\theta_v$  é o ângulo de visada do sensor,  $L_i$  é a radiância intrínseca do alvo e  $L_p$  é a radiância de múltiplos espalhadores. É possível perceber que as radiâncias das trajetórias 3 e 5 influenciam na informação espectral do alvo de interesse. Sendo assim, a radiância  $L_T$ , que segue para o sensor, conterà informações espectrais importantes das energias de trajetórias 1, 3 e 5.

Para Moreira (2005), os componentes do solo que influenciam na radiação refletida da superfície são óxido de ferro, umidade, matéria orgânica, granulometria, mineralogia da argila, material de origem, cor do solo, temperatura, localização etc.

A quantidade de energia refletida por determinado tipo de solo é função de todos os componentes que se encontram misturados nele e cada componente da mistura contribui de maneira diferente nos valores de energia refletida observados para o solo e,

portanto, a energia refletida por um solo é a soma integrada de todas as energias refletidas pelos seus diferentes componentes (MOREIRA, 2005).

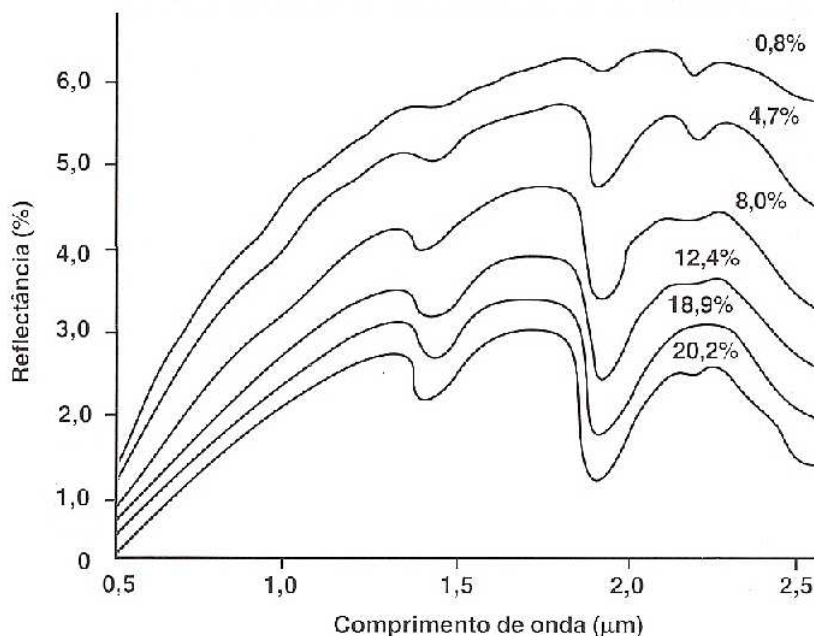


Figura 03. Curvas espectrais de solos com diferentes porcentagens de água.

Fonte: adaptada de Bowers e Hanks (1965).

A Figura 03 apresenta algumas respostas espectrais de solos contendo diferentes porcentagens de água. Ao observar a ilustração, é possível perceber que o solo com 20,2% de umidade apresentou menor refletância. Sendo assim, solos mais úmidos apresentam uma refletância menor que os solos mais secos.

No que diz respeito à vegetação, a refletância está associada às características das folhas. A forma da curva espectral é então definida por diferentes constituintes da folha (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2007), as folhas absorvem muita energia na região do espectro do visível (0,40  $\mu\text{m}$  a 0,72  $\mu\text{m}$ ) que é utilizada na fotossíntese. Os pigmentos predominantes absorvem radiação na região do azul (0,44  $\mu\text{m}$ ) e a clorofila absorve na região do vermelho (0,64  $\mu\text{m}$ ). Na região do infravermelho próximo (0,72  $\mu\text{m}$  a 1,10  $\mu\text{m}$ ) ocorrem absorção pequena da radiação e considerável espalhamento interno da radiação na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região e a refletância é quase constante. Na região do infravermelho médio (1,10  $\mu\text{m}$  a 3,20  $\mu\text{m}$ ) os valores de refletância

são influenciados pelo conteúdo de umidade das folhas. A água absorve consideravelmente a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,30  $\mu\text{m}$  a 2,00  $\mu\text{m}$ .

A água está presente na natureza sob a forma líquida (água propriamente dita), água em forma de nuvem e água em forma de neve. Os diferentes estados físicos da água influenciam o seu comportamento espectral (NOVO, 1989).

Nos corpos d'água, quando a água é profunda e pura (sem a presença de materiais em suspensão ou matéria orgânica) há absorção praticamente de todo o fluxo radiante incidente nos comprimentos de onda entre 0,74  $\mu\text{m}$  e 2,5  $\mu\text{m}$  (JENSEN, 2009).

Bowker et al. (1985) afirmam que as altas concentrações de sedimentos em suspensão, que muitas vezes ocorrem em reservatórios superficiais, podem aumentar a refletância da água. Os mesmos autores acrescentam que as algas presentes na superfície da água também podem alterar as propriedades de refletância da água, porém, diferentemente dos sedimentos em suspensão, as algas, devido à clorofila, apresentam características de absorção na faixa vermelha do espectro eletromagnético.

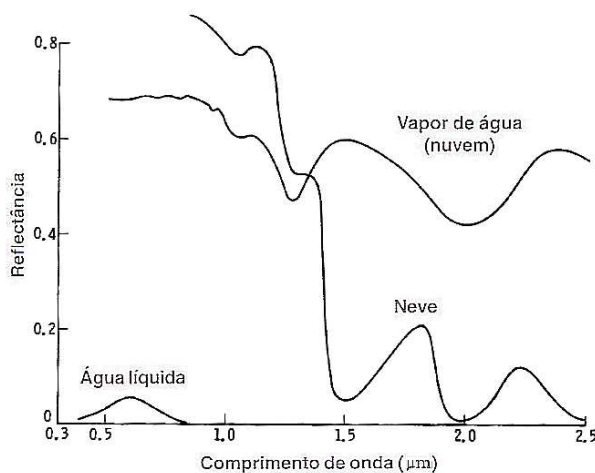


Figura 04. Curvas de refletância da água nos estados líquido, gasoso e sólido.

Fonte: adaptada de Bowker et al. (1985).

A Figura 04 apresenta as curvas de refletância da água nos estados líquido, gasoso e sólido. É possível verificar que a água líquida absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 0,38  $\mu\text{m}$  e acima de 0,70  $\mu\text{m}$  e sua refletância, na faixa espectral entre 0,38  $\mu\text{m}$  e 0,70  $\mu\text{m}$ , é baixa.

Para Novo (1989), concreto e asfalto são materiais que compõem grande parte das áreas edificadas pelo homem. Bowker et al. (1985) realizaram um estudo sobre o comportamento espectral desses materiais.

Segundo Bowker et al (1985), a curva espectral do asfalto apresenta refletância baixa e decrescente nos comprimentos de ondas entre 0,3  $\mu\text{m}$  e 0,4  $\mu\text{m}$ ; refletância crescente entre 0,4  $\mu\text{m}$  e 0,6  $\mu\text{m}$ ; refletância de 0,2 entre 0,6  $\mu\text{m}$  e 1,0  $\mu\text{m}$ ; e refletância crescente até o comprimento de onda 1,3  $\mu\text{m}$ .

Ao comparar o concreto com o asfalto, a curva espectral do concreto apresenta valores mais altos que a curva espectral do asfalto. A curva espectral do concreto é caracterizada pelo aumento da refletância com o comprimento de onda e apresenta absorção de energia em 0,38  $\mu\text{m}$ , entre 0,6  $\mu\text{m}$  e 0,8  $\mu\text{m}$  e em 1,1  $\mu\text{m}$  (BOWKER ET AL, 1985).

As curvas espectrais desses materiais são apresentadas na Figura 05.

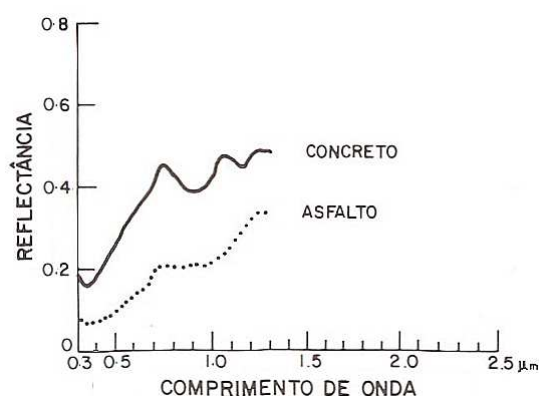


Figura 05. Comportamento espectral do concreto e do asfalto.

Fonte: adaptada de Bowker et al. (1985).

### 2.3 Índices de realce utilizados e propostos por Polidório (2007)

Índices de realce são úteis em procedimentos de análise de imagens que envolvem a aplicação de técnicas de segmentação projetadas para imagens monocromáticas, o que é bastante usual nessa área do conhecimento.

Os seguintes índices de realce foram utilizados no trabalho de Polidório (2007): NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), WWI (Weighted Water Index),

mWI (maximum Water Index), nSI (normalized Shadow Index), sSI (spectral Shadow Index), RWSI (Road-Water-Shadow Index) e nRI (normalized Road Index).

O Índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) tem sido amplamente utilizado em diferentes abordagens no monitoramento da vegetação (PONZONI e SCHIMABUKURO, 2007). Trata-se de um índice que realça a vegetação explorando os baixos valores de refletância desse alvo na faixa do vermelho do espectro eletromagnético e valores mais elevados na faixa do infravermelho próximo (POLIDORIO, 2007). Segundo Ponzoni e Schimabukuro (2007), a formulação do NDVI é feita através da seguinte equação:

$$NDVI = \left( \frac{NIR - R}{NIR + R} \right) \quad (03)$$

Polidorio (2007) afirma que a equalização do histograma produzida pelos valores de brilho da imagem adquirida na faixa do infravermelho realça a diferença entre feições de aparência clara com as de aparência escura e esse contraste entre feições claras e escuras é explorado para propor índices de realce para alvos específicos, bem como para usar no cômputo de índices tradicionais, como o NDVI.

Além do uso do índice NDVI que realça a vegetação, Polidorio (2007) utilizou outros índices para realçar a presença de outros alvos, a partir dos atributos: componentes intensidade (I) e saturação (S) extraídos do sistema de cor HSI; imagens adquiridas nas faixas do azul (B), do verde (G) e do vermelho (R) do espectro eletromagnético extraídas do sistema de cor RGB; e imagem adquirida na faixa do infravermelho próximo (NIR). Esses índices foram propostos e definidos da seguinte maneira:

- Weighted Water Index (WWI) foi proposto no trabalho de Polidorio et al. (2004) baseado no índice Normalized Difference Water Index (NDWI) de McFeeters (1988). Os autores constataram que a média do salto de refletância entre os valores observados na banda verde (G) e infravermelho próximo (NIR) correspondia aproximadamente à ordem de 4, ou seja,  $G \cong 4NIR$ . O índice WWI é utilizado para realçar nuvens, áreas sombreadas e corpos d'água e sua formulação é dada pela Equação 04.

$$WWI = \left( \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} \right) \quad (04)$$

- maximum Water Index (mWI) utiliza os maiores valores de brilho possíveis entre as três imagens adquiridas na faixa do espectro visível (ou nas respectivas bandas R, G e B de uma imagem colorida). Assim, é criada uma nova imagem M composta somente com os maiores valores de brilho registrados entre as três imagens (POLIDORIO, 2007). Como o objetivo é obter os maiores valores de brilhos para corpos d'água e como é esperado que a imagem infravermelha (NIR) registre os menores valores de brilho para corpos d'água, então, a diferença normalizada entre as imagens M e NIR realçará os corpos d'água. A formulação do índice mWI é dada pela Equação 05.

$$mWI = \left( \frac{M - NIR}{M + NIR} \right) \quad (05)$$

- normalized Shadow Index (nSI) realça as regiões sombreadas a partir da diferença normalizada entre os componentes S e I do sistemas de cor HSI (POLIDORIO, 2007). Nesse sistema, o componente cor é disjuncto (independente) dos componentes intensidade e saturação (GONZALEZ e WOODS, 1992). A formulação do índice nSI é dada pela Equação 06.

$$nSI = \frac{S - I}{S + I} \quad (06)$$

- spectral Shadow Index (sSI) é semelhante ao índice nSI, porém a diferença está na utilização dos valores de brilho da imagem infravermelha (NIR) em substituição ao componente intensidade (I). Segundo Polidorio (2007), essa substituição promove um maior contraste entre vegetação e sombra, pois os valores de brilhos associados aos pixels de vegetação são muito maiores na imagem NIR que os observados no componente intensidade. De acordo com mesmo autor, o índice sSI também promove um realce significativo sobre corpos d'água, devido aos baixos valores de brilho registrados na imagem NIR para pixels relativos a esse alvo. A formulação do índice sSI é dada pela Equação 07.

$$sSI = \frac{S - NIR}{S + NIR} \quad (07)$$

- Road-Water-Shadow Index (RWSI) é obtido pela diferença normalizada entre o componente intensidade (I) e a imagem infravermelha (NIR). Segundo Polidorio (2007), o valor de intensidade dos alvos das classes sombra, corpo d'água e via pavimentada é maior que o valor correspondente na imagem NIR. Com isto, a diferença positiva em favor da intensidade é realçada na formulação do índice RWSI, dada pela Equação 08.

$$RWSI = \frac{I - NIR}{I + NIR} \quad (08)$$

- normalized Road Index (nRI) é obtido pela composição dos índices RWSI, NDVI e nSI. De acordo com Polidorio (2007), o índice com menor correlação com o RWSI sobre via pavimentada é o nSI, e o com maior correlação é o NDVI. Entretanto, o valor da soma ( $NDVI + nSI$ ) é menor que o valor correspondente ao RWSI sobre via pavimenta. O resultado dessa soma apresenta muitos pontos onde valores NDVI e valores nSI se anulam ou ambos são negativos. Com o alargamento linear do histograma ( $h^s$ ) os valores dos índices são deslocados para o lado positivo, deixando de ocupar o intervalo  $[-1,1]$  para ocupar o intervalo  $[0,1]$ . As maiores diferenças das formas  $h^s(RWSI)$  e  $h^s(NDVI + nSI)$  estão sobre via pavimentada, corpo d'água e sombra. Com base nisso, a formulação para realçar via pavimentada é dada pela Equação 09.

$$nRI = \frac{h^s(RWSI) - h^s(NDVI + nSI)}{h^s(RWSI) + h^s(NDVI + nSI)} \quad (09)$$

## 2.4 Função de mapeamento

Polidorio (2007) definiu uma função de mapeamento para transformar dados dispostos em estruturas bidimensionais (matriz) em unidimensionais (vetores) e possibilitar a formulação matemática adequada dos métodos utilizados na identificação de alvos específicos.

Seja B uma matriz de dimensões m x n que contém somente valores binários. Seja também a função SUM dada por:

$$SUM(B) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad (10)$$

O resultado de  $SUM(B)$  é a quantidade de elementos da matriz  $B$  associados com o valor 1. Por exemplo, se  $B$  é uma matriz binária de ordem  $3 \times 3$  e se é composta somente por valores 1, então  $SUM(B)$  produz o valor 9, o que indica que na matriz  $B$  existem 9 valores 1.

Seja  $M$  uma matriz de dimensões  $m \times n$  que contém valores pertencentes ao conjunto dos valores reais. Seja  $A_p$  a seguinte função de mapeamento:

$$X_{ij} = A_p(B, M) \quad (11)$$

onde:  $1 \leq p \leq SUM(B)$ ;  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $p, i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

A função de mapeamento  $A_p$  tem como resultado o vetor  $X_{ij}$  com valores mapeados por  $1 \leq p \leq SUM(B)$  originados de  $M_{ij}$  e  $B_{ij}$ , ou seja,  $X_{ij}$  é o vetor de valores ND originados da matriz  $M_{ij}$  nas posições onde os elementos da matriz onde  $B_{ij} = 1$ .

Para entender melhor sobre a aplicação da função de mapeamento, Polidório (2007) apresenta o exemplo a seguir:

Se  $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  e  $M = \begin{pmatrix} 1,00 & 2,50 \\ 3,00 & 4,00 \end{pmatrix}$ , então  $X = A_p(B, M)$  produz o vetor  $X = (1,00 \quad 4,00)$ .

Ou se  $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  e  $M = \begin{pmatrix} 1,00 & 2,50 \\ 3,00 & 4,00 \end{pmatrix}$ , então  $X = A_p(B, M)$  produz o vetor  $X = (1,00 \quad 2,50 \quad 4,00)$ ;

Assim, essa operação booleana produz um vetor  $X_{ij}$  com valores de ND da matriz  $M_{ij}$  somente das posições onde  $B$  assume valor verdadeiro.

## 2.5 Limiarização

Segundo Gonzalez e Woods (1992), a técnica de limiarização mais simples é a do particionamento do histograma da imagem por um limiar único  $T$ . A limiarização é então realizada, varrendo-se a imagem, pixel por pixel, e rotulando-se o valor 0 (zero) aos pixels com tons de cinza menores que o limiar ( $T$ ) e o valor 1 (um) aos pixels com tons acima do limiar.

De acordo com os autores, uma imagem que sofreu limiarização  $g(x,y)$  é definida como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) > T \\ 0, & \text{se } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (12)$$

O elemento  $f(x,y)$  é o nível de cinza do pixel  $(x,y)$  e  $T$  é o limiar. Ou seja, cada pixel  $(x,y)$  tal que  $f(x,y) > T$  é denominado um ponto do objeto; caso contrário, o ponto é denominado um ponto de fundo. Nesse caso,  $T$  depende apenas de  $f(x,y)$ , e então, o limiar é chamado global.

De acordo com os autores, o sucesso desse método depende de quão bem o histograma pode ser particionado.

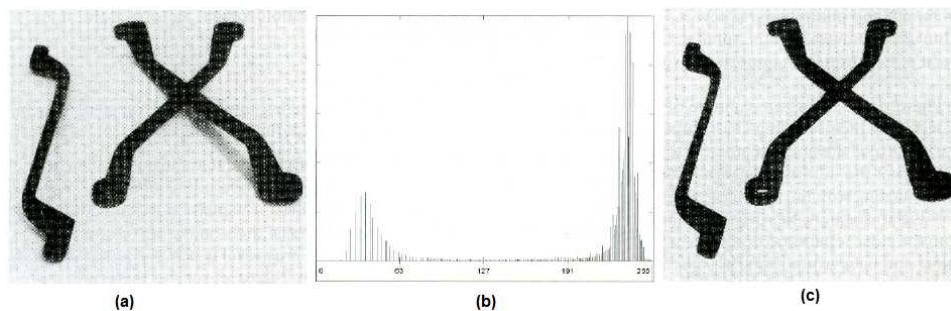


Figura 06. Limiarização global. (a) Imagem original, (b) seu histograma e (c) segmentação com  $T=90$ . Fonte: adaptada de Gonzalez e Woods (1992).

A Figura 06 ilustra um exemplo de limiarização global com limiar  $T = 90$ . O resultado é uma imagem com os objetos sem as sombras. Os objetos de interesse são mais escuros que o fundo, de modo que cada pixel com nível de cinza  $\leq T$  foi rotulado de 0 (preto) e o pixel com nível de cinza  $> T$  foi rotulado como 255 (branco).

## 2.6 Morfologia matemática

A morfologia matemática surgiu na década de 1960, na École Nationale Supérieure des Mines de Paris, quando Georges Matheron e Jean Serra começaram a resolver problemas de análise de imagens: extrair informações de imagens a partir de transformações de formas realizadas através dos operadores ou transformações elementares denominados erosão e dilatação (BANON; BARRERA, 1998).

A palavra morfologia normalmente denota uma área da biologia que trata a forma e a estrutura de animais e plantas. É utilizada no contexto da morfologia matemática como uma ferramenta para a extração de componentes de imagens que sejam úteis na representação e descrição da forma de uma região (GONZALES; WOODS, 1992).

A morfologia matemática engloba um conjunto de operações morfológicas não lineares, que, por exemplo, pode remover ruído, detectar arestas ou realizar operações mais complexas. A teoria de conjuntos é a linguagem da morfologia matemática. Em seu fundamento, a erosão e a dilatação são as operações elementares que formam a base para a maioria das operações morfológicas (GONZALES; WOODS, 1992).

A erosão e a dilatação foram criadas a partir de noções de soma e subtração de Minkowski. As transformações introduzidas nas imagens binárias pela erosão e dilatação dependem de padrões definidos chamados elementos estruturantes. Na dilatação, o elemento estruturante cobre pelo menos parte do objeto e na erosão, o elemento estruturante está contido no objeto (BANON; BARRERA, 1998).

### Erosão

De acordo com Soille (1999), a erosão de uma imagem  $X$  por um elemento estruturante  $B$ , é definida como:

$$[\mathcal{E}_B(f)](x) = \min_{b \in B} f(x + b) \quad (13)$$

onde o valor da erosão ( $\mathcal{E}_B$ ), para um dado pixel  $x$ , é o valor mínimo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$ .

Segundo Gonzales e Woods (1992), os efeitos da erosão de uma imagem são: (1) escurecimento da imagem de saída, se todos os valores do elemento estruturante forem positivos; e (2) redução de detalhes claros na imagem de saída, se eles forem menores que o elemento estruturante, sendo que o grau dessa redução é determinado pelos valores dos níveis de cinza em torno do detalhe claro, pela forma do detalhe claro e pelos valores de amplitude do elemento estruturante.

A Figura 07(b) mostra os efeitos da erosão sobre uma imagem em tons de cinza. O operador de erosão foi aplicado à imagem original com um elemento estruturante de disco (com raio igual a 11 pixels).

### Dilatação

A dilatação de uma imagem  $X$  por um elemento estruturante  $B$ , segundo Soille (1999), é definida como:

$$[\delta_B(f)](x) = \max_{b \in B} f(x + b) \quad (14)$$

onde o valor da dilatação ( $\delta_B$ ), para um dado pixel  $x$ , é o valor máximo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$ .

De acordo com Gonzales e Woods (1992), os efeitos da dilatação de uma imagem são: (1) clareamento da imagem de saída, se todos valores do elemento estruturante forem positivos; e (2) redução de detalhes escuros na imagem de saída, dependendo de como seus valores e formatos estejam relacionados com o elemento estruturante usado para a dilatação.

A Figura 07(c) mostra os efeitos da dilatação sobre uma imagem em tons de cinza. O operador de dilatação foi aplicado à imagem original com um elemento estruturante de disco (com raio igual a 11 pixels).

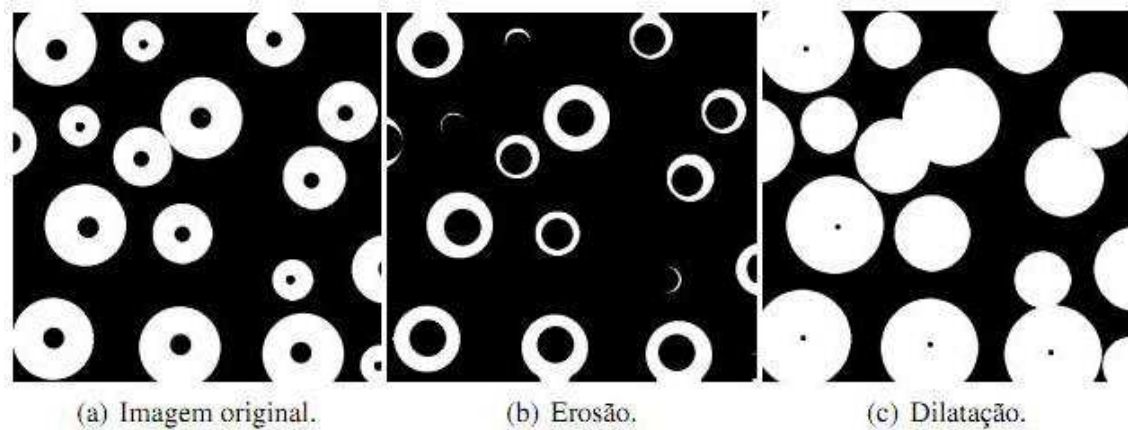


Figura 07. Efeito da erosão e da dilatação na imagem. (a) Imagem original. (b) Imagem resultado da erosão. (c) Imagem resultado da dilatação.

Fonte: adaptada de Gonzales e Woods (1992).

### Abertura e fechamento

A abertura e o fechamento são operadores morfológicos definidos pela combinação entre os operadores erosão e dilatação. A abertura é uma operação que consiste numa erosão seguida de uma dilatação. O Fechamento consiste numa dilatação seguida de uma erosão.

Soille (1999) define a abertura de uma imagem  $X$  por um elemento estruturante  $B$  como:

$$[\gamma_B(x)] = \delta_{B'}[\varepsilon_B(x)] \quad (15)$$

onde o valor da abertura ( $\gamma_B$ ) é constituído pela erosão de  $x$  por  $B$ , seguida da dilatação pelo elemento estruturante transposto  $B'$ .

Segundo Gonzales e Woods (1992), a operação de abertura é aplicada na remoção de detalhes claros em uma imagem, enquanto não altera os níveis de cinza em geral, ou seja, a erosão inicial remove os detalhes claros e escurece a imagem, enquanto a dilatação subsequente clareia a imagem sem reintroduzir os detalhes removidos pela erosão.

A Figura 08(b) mostra os efeitos da abertura sobre uma imagem em tons de cinza. O operador de abertura foi aplicado à imagem original com um elemento estruturante de disco (com raio igual a 11 pixels).

O operador morfológico fechamento é definido por Soille (1999) como:

$$[\phi_B(x)] = \varepsilon_{B'}[\delta_B(x)] \quad (16)$$

onde o valor do fechamento ( $\phi_B$ ) é constituído pela dilatação de  $x$  por  $B$ , seguida da erosão pelo elemento estruturante transposto  $B'$ .

Para Gonzales e Woods (1992), a operação de fechamento é aplicada na remoção de detalhes escuros em uma imagem, enquanto deixa os elementos claros relativamente inalterados, ou seja, a dilatação inicial remove os detalhes escuros e clareia a imagem, enquanto a erosão subsequente escurece a imagem sem reintroduzir os detalhes removidos pela dilatação.

A Figura 08(c) mostra os efeitos do fechamento sobre uma imagem em tons de cinza. O operador de fechamento foi aplicado à imagem original com um elemento estruturante de disco (com raio igual a 11 pixels).

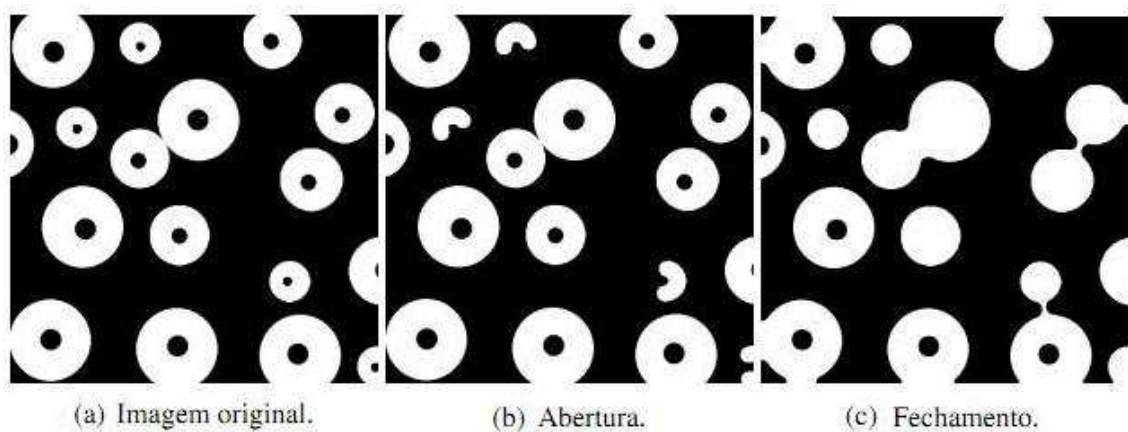


Figura 08. Efeito da abertura e do fechamento na imagem. (a) Imagem original. (b) Imagem resultado da abertura. (c) Imagem resultado do fechamento.

Fonte: adaptada de Gonzales e Woods (1992).

## 2.7 Sistema sensor câmara de quadro

Uma câmara digital genérica é composta pelos principais componentes: sistemas de lentes, matriz de elementos sensores (dispositivo que transforma a energia luminosa em energia elétrica), conversor analógico/digital (A/D); processadores e memória para armazenamento das imagens (TOMMASELLI; GALO; HASEGAWA, 2000).

De acordo com Jensen (2009), o sensor de imageamento de uma câmara digital é um circuito integrado de detector por carga acoplada (CCD, charge-coupled device) ou de semicondutor metal-óxido complementar (CMOS, complementary metal oxide semiconductor), no qual acontece a conversão da luz em elétrons que podem ser medidos e convertidos em valores de intensidade radiométrica.

O mesmo autor descreve o processo de conversão da luz em valores de intensidade radiométrica da seguinte maneira: inicialmente, a objetiva focaliza a luz proveniente da cena sobre a matriz de detectores uni-dimensional ou bi-dimensional; em seguida, os fótons de luz que iluminam cada um dos detectores produzem uma carga elétrica diretamente relacionada com a quantidade de energia radiante incidente; o sinal analógico é eletronicamente amostrado e convertido num valor digital de brilho que varia de 8-bit (valores 0-255) a 12-bit (valores 0-4095); e por fim, o valor de brilho obtido na conversão analógico para digital pode ser armazenado e lido por um computador.

Para Linder (2009), no desenvolvimento de câmaras digitais aéreas há 2 estratégias de construção, no presente trabalho adota-se uma delas, a qual utiliza um sensor que mantém o princípio da perspectiva central (muito comum nas câmaras de filme); a outra utiliza um sensor em toda a linha de voo para coletar dados continuamente durante o voo, mas não é tratado nesse trabalho.

A primeira estratégia, chamada de câmara de quadro, apresenta uma limitação na área do recobrimento aerofotogramétrico devido à pequena dimensão dos sensores CCD disponíveis (RUY, 2004), e por outro lado, um aumento na dimensão dos sensores CCD seria extremamente caro (LINDER, 2009).

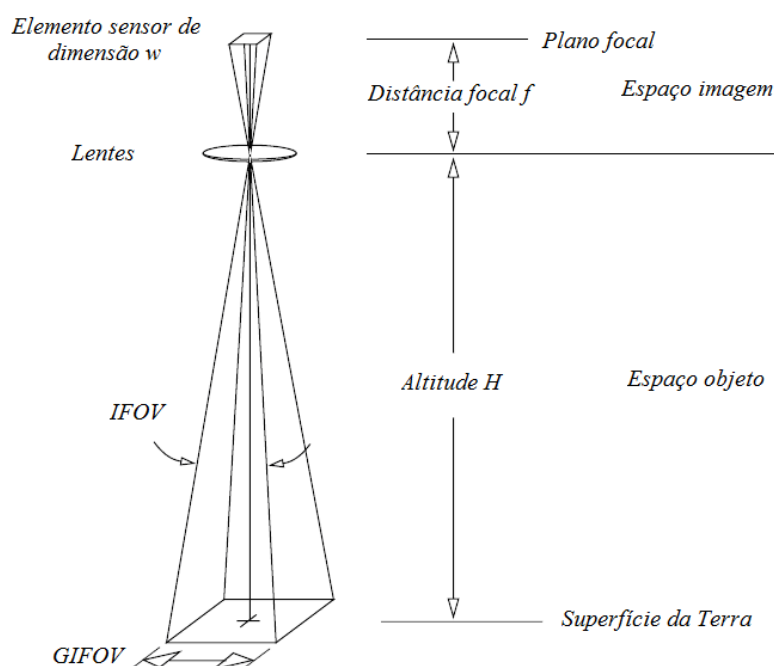


Figura 09. Representação do sistema sensor câmara de quadro.

Fonte: Schowengerdt (2007).

A Figura 09 apresenta a descrição geométrica de um elemento detector no plano focal de um sensor óptico. No funcionamento do sistema de quadro, a cada vez, a imagem digital é obtida a partir do elemento sensor de dimensão ( $w$ ) que quando projetado na superfície da Terra representa o *Ground-projected Instantaneous Field of View* (GIFOV), também chamado de *Ground Sample Distance* (GSD).

## 2.8 SAAPI

A elaboração de um projeto alternativo de aquisição de imagens para fins de mapeamento com câmaras digitais de médio formato motivou a parceria entre o Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da Universidade Estadual Paulista (UNESP) e a empresa Engenharia, Mapeamento e Aerolevanteamento Ltda. (ENGEMAP) a desenvolver o Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais (SAAPI).

Segundo Ruy (2008), o Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais (SAAPI) é formado por uma plataforma de coleta,

composta por sensores ópticos e de posição/orientação e uma unidade de controle e alimentação, com processadores e baterias; e algoritmos de calibração e processamento de imagens e dados espaciais.

A plataforma de coleta de imagens pode ser formada por duas câmaras digitais em configuração dual convergente ou apenas uma câmara disposta em modo nadiral. Também, pode ser integrada à plataforma de coleta uma câmara digital com filtro para a captura de imagens infravermelhas na posição nadir (RUY et al., 2008). A adição dessa câmara digital torna possível, depois de submetido a um processamento geométrico rigoroso, a produção de imagem multiespectral com esse tipo de sistema. O suporte de fixação das câmaras possui amortecedores para a atenuação das vibrações e uma base giratória para a correção da deriva em voo. Na unidade de controle e alimentação é fixado um notebook, para o controle do disparo das câmaras, coleta e sincronismo dos dados GPS e navegação em voo; duas unidades de armazenamento; e caixa e conectores para o disparo sincronizado das câmaras (RUY et al., 2007).



Figura 10. Estrutura do SAAP. (a) Plataforma de coleta. (b) Unidade de controle e alimentação. Fonte: adaptada de Ruy et al. (2007).

A Figura 10 mostra um dos suportes para câmaras desenvolvido para garantir a geometria e estabilidade das orientações internas das câmaras e a orientação relativa entre elas na plataforma de coleta. De fato, o suporte do sistema usado na tomada das imagens utilizadas neste trabalho possui apenas uma câmara digital, no lugar das duas mostradas na Figura 10.

O sistema de aquisição é baseado na utilização de câmaras digitais integradas a um sistema de georreferenciamento direto composto por uma unidade de navegação inercial táctica e um receptor GPS de dupla-frequência (RUY, 2008).

Uma configuração para o sistema de aquisição, proposta por Ruy (2008), é baseada no posicionamento das câmaras digitais de forma convergente, com a aquisição automática e simultânea das imagens por meio de interface eletrônica, de tal forma que elas registrem áreas subsequentes do terreno, com pequena sobreposição (10%).

Além disso, o autor ainda sugere uma câmara para a captura de imagens infravermelhas posicionada na plataforma de coleta, com a coleta simultânea e sincronizada com as imagens coloridas. Para melhor esclarecer, a Tabela 01 apresenta as possibilidades de configurações da plataforma de coleta.

Tabela 01. Opções de coleta do SAAPI.

| ITENS                                            | OPÇÕES              |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                  | A                   | B                                                                                                                                                                               | C                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Câmaras utilizadas                               | 1 câmara Hasselblad | 1 câmara Hasselblad<br>1 câmara infravermelha                                                                                                                                   | 2 câmaras Hasselblad<br>1 câmara infravermelha                                                                                                                                                                                                                   |
| Modo de coleta                                   | Vertical            | Vertical                                                                                                                                                                        | Câmara Hasselblad:<br>Modo dual convergente<br>Câmara infravermelha:<br>Modo Vertical                                                                                                                                                                            |
| Resolução                                        | 5412 x 7216 pixels  | Câmara Hasselblad:<br>5412 x 7216 pixels<br>f = 50 mm<br>pixel: 6,8 microns<br>Câmara Infravermelha:<br>3264 x 2164 pixels<br>f = 35 mm<br>Pixel: 10,7 microns<br>(equivalente) | Câmara Hasselblad:<br>5412 x 7216 pixels<br>f = 50 mm<br>Pixel: 6,8 microns<br>Área de coleta aproximada<br>das 2 câmaras Hasselblad:<br>11000 x 6800 pixels<br>Câmara Infravermelha:<br>3264 x 2164 pixels<br>f = 28 mm<br>Pixel: 10,7 microns<br>(equivalente) |
| Disparo controlado e sincronizado por computador |                     |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Registro de eventos no GPS                       |                     |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Fonte: adaptada de Ruy (2008).

## 2.9 Efeito Vinhete

Lillesand e Kiefer (1987) afirmam que durante o processo de aquisição de imagens digitais podem ocorrer variações nas respostas espectrais dos elementos que causam imperfeições nas imagens aéreas, essas imperfeições ocorrem devido às influências de fenômenos de origem geométrica e atmosférica.

Os fenômenos de origem geométrica, de acordo com Lillesand e Kiefer (1987), estão associados a uma variação nos valores de brilho do pixel em função da distância do pixel até o centro da imagem, por exemplo, o efeito vinhete.

No Manual de Fotogrametria, o efeito vinhete é definido como efeito radial de escurecimento da imagem (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980), ou seja, os elementos próximos à região central da imagem são mais claros e os elementos próximos à região de borda são mais escuros.

De acordo com Nobrega (2002), a variação da intensidade de luz está associada à lei do cosseno descrita pelas relações geométricas formadas entre o ângulo de incidência dos raios luminosos, a distância focal da câmara e o plano do filme, dada pela seguinte equação:

$$I(b) = \cos(b)^n \quad (17)$$

onde: I corresponde à iluminação que atinge o plano do filme; b é o ângulo entre o eixo óptico e o raio; e n valor que varia de 2,5 a 4,0.

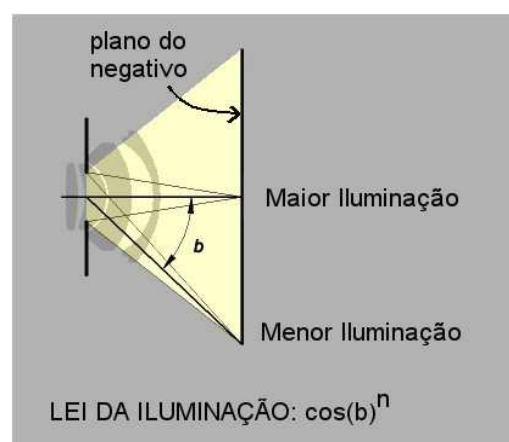


Figura 11. Variação da iluminação ao longo do plano negativo devido ao efeito vinhete.

Fonte: Silva e Candeias (2009).

Silva e Candeias (2009) afirmam que o efeito vinhete causa na imagem isolada uma distribuição não uniforme de iluminação. No mosaico, Nobrega (2002) diz que causa uma sensação de descontinuidade na iluminação, tornando necessária a correção desse efeito.

## **2.10 Correção do Efeito Vinhete**

Para Nóbrega e Quintanilha (2004), a correção do efeito vinhete pode ser realizada com balanceamento de cores e uniformização de histogramas entre as partes claras e escuras das imagens. Para Nóbrega (2002), muitos aplicativos comerciais utilizam estes procedimentos, porém os resultados nem sempre são satisfatórios.

Langhi e Tommaselli (2008) desenvolveram um programa em linguagem C que realiza correção radiométrica em bloco de imagens aéreas, pela análise dos histogramas e pelo ajuste de superfície parabolóide às diferenças radiométricas entre as imagens, que permite a correção do efeito vinhete.

Nobrega (2002) realizou testes no programa Erdas para verificar a eficiência desse programa quanto à correção do efeito vinhete. O autor apontou o uso de modelo de balanceamento por superfície na compensação da diferença no padrão de luminosidade das imagens. Porém, o modelo apresenta quatro superfícies que, mesmo adequando-se à maioria das necessidades, podem não ser suficientes como solução de balanceamento de imagens.

## **2.11 Análise de superfície de tendência**

Segundo Landim (1998), a análise de superfícies de tendência é uma técnica que fornece uma superfície que melhor se adapta a um conjunto de observações, aos quais se deseja correlacionar a distribuição de uma variável dependente Z em função das coordenadas X e Y, no caso tridimensional, pelo modelo linear geral, semelhantemente ao modelo linear

simples (bidimensional), que visa o encaixe da melhor curva aos pares (x e y) de valores observados.

De acordo com o mesmo autor, a aplicação dessa técnica consiste na coleta de dados sobre uma malha regular, utilizando-se polinômios ortogonais e possibilitando o uso do modelo de análise das séries de Fourier. Mas, se não for possível a coleta regular de dados, então, gera-se uma malha irregular de amostragem e faz-se mister a utilização de polinômios não ortogonais, procurando adaptar uma superfície linear aos dados, em seguida uma quadrática e assim por diante, sendo usual o emprego da regressão pelos mínimos quadrados como método para o ajuste da superfície aos dados.

A Figura 12 mostra o comportamento espacial de variáveis dependentes condicionadas por uma variável independente (linhas), duas variáveis independentes (superfícies) e três variáveis independentes (hipersuperfícies).

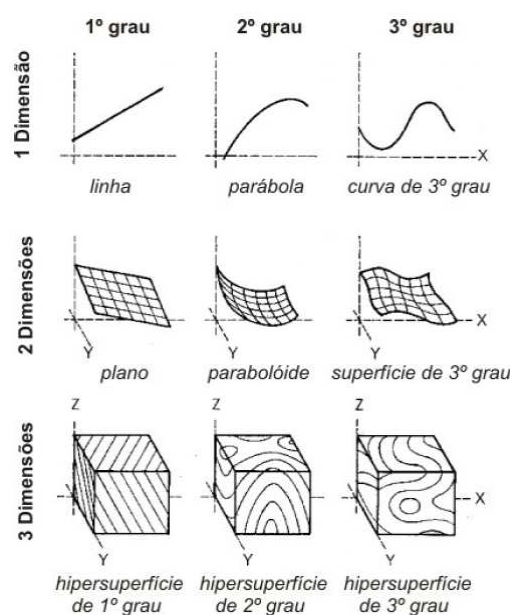


Figura 12. Comportamento espacial de variáveis dependentes.

Fonte: Landim (1998).

Para Landim (1998), o modelo para a representação da superfície de tendência geral é dado por:

$$z_0(x_i, y_j) = z_t(x_i, y_j) + e_{ij} \quad (18)$$

onde:  $z_0(x_i, y_j)$  é o valor observado da variável mapeada,  $z_t(x_i, y_j)$  é o valor de tendência da variável mapeada; e  $e_{ij}$  representa o resíduo.

Segundo Landim (1998), o modelo para a representação da superfície pelo método dos polinômios não ortogonais é dado por:

$$z_t(x_i, y_j) = (a_0 + a_1x_i + a_2y_j + a_3x_i^2 + a_4x_iy_j + a_5y_j^2 + \dots) + e_{ij} \quad (19)$$

onde:  $z_t(x_i, y_j)$  é a variável mapeada em função das coordenadas  $x_i$  e  $y_j$ ; e  $e_{ij}$  representa o resíduo.

Sendo assim, a representação de uma superfície linear é dada por:

$$z_t(x_i, y_j) = (a_0 + a_1x_i + a_2y_j) + e_{ij} \quad (20)$$

A representação de uma superfície quadrática é representada por:

$$z_t(x_i, y_j) = (a_0 + a_1x_i + a_2y_j + a_3x_i^2 + a_4x_iy_j + a_5y_j^2) + e_{ij} \quad (21)$$

E assim, por diante seguem-se as representações das superfícies de grau superior, no mesmo processo de desenvolvimento polinomial.

Landim (1998) sugere realizar a análise de variância como teste estatístico para verificar qual a contribuição dos sucessivos coeficientes parciais de regressão e fornecer uma medida de ajustamento aos dados devido a cada um dos incrementos da equação polinomial, com base na tabela a seguir:

Tabela 02. Análise da variância para a escolha do melhor polinômio

| FONTE DE VARIAÇÃO         | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$     |
|---------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| Regressão de grau p       | SQP                | K                 | MQP=SQP/k           | MQP/MQR   |
| Resíduos referentes à p   | SQR                | n-k-1             | MQR=SQR/(n-k-1)     |           |
| Regressão de grau p+1     | SQP1               | M                 | MQP1=SQP1/m         | MQP1/MQR1 |
| Resíduos referentes à p+1 | SQR1               | n-m-1             | MQR1=SQR/(n-m-1)    |           |
| Incremento de p para p+1  | SQI                | m-k               | MQI=SQI/(m-k)       | MQI/MQR1  |
| Total                     | SQT                | n-1               | MQT=SQT/(n-1)       |           |

Fonte: adaptada de Landim (1998).

dado que:

variação total:  $SQT = \sum y_i^2 - \left[ \left( \sum y_i \right)^2 / n \right]$ ;

variação devido à superfície calculada:  $SQP = \sum y_i'^2 - \left[ \left( \sum y_i' \right)^2 / n \right]$ ;

variação devido aos resíduos:  $SQR = SQT - SQP$ ;

variação devido ao incremento:  $SQI = SQP1 - SQP$ ;

teste de significância relativo à superfície de tendência de grau p:  $MQP / MQR$ ;

teste de significância relativo à superfície de tendência de grau p+1:  $MQP1 / MQR1$ ;

teste de significância relativo à melhoria de ajuste da superfície p+1 comparada a p:  $MQI / MQR1$ ;

SQ: soma dos quadrados; MQ: média quadrática;

$F_c$ : razão entre médias quadráticas;

n: número de observações;

k: coeficientes da regressão polinomial de grau p;

m: coeficientes da regressão polinomial de grau p+1;

y e y': valor da variável observada e estimada pela regressão polinomial, respectivamente.

Cada polinômio deve ser avaliado num teste baseado no valor F calculado, o qual é comparado com o valor de F crítico, de acordo com o número de graus de liberdade do polinômio e dos resíduos. Esse teste é realizado com 5% de significância, sendo que todos polinômios aceitos no teste são comparados entre si com base no incremento da contribuição do grau de explicação obtido na mudança de um polinômio de maior grau para outro de menor grau. Os testes aplicados são descritos em seguida.

A hipótese nula ( $H_0$ ) significa que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste aos dados é nula e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) significa que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste aos dados é significativa.

Portanto, se o valor de  $F_c$  (calculado) for menor que  $F_t$  (tabelado), aceita-se a hipótese nula  $H_0$ , pois o incremento do grau de explicação ou da diminuição da variância pela adoção do modelo analisado é insignificante, no nível de 5%, para adotar o modelo analisado como superfície de tendência. Caso contrário, rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$ , que admite que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste dos dados é significativa. Dessa forma, adota-se como modelo ou superfície de tendência a função selecionada pela aplicação do teste. Esse teste é aplicado para avaliar todos os modelos ajustados de forma que seja adotado o modelo que melhor explique a tendência de variação do fenômeno no espaço.

## 2.12 Avaliação da qualidade do resultado da identificação de alvos

Esse item trata da avaliação da qualidade do resultado relacionado com o reconhecimento de padrões.

Segundo Chuvieco (2002), essa avaliação permite ao usuário verificar a qualidade do resultado a partir de técnicas de amostragem que estimam, com exatidão, o erro que contém o resultado do reconhecimento de padrões.

Nesse caso, para avaliar e estimar a acurácia do resultado é utilizada a matriz dos erros, também conhecida como matriz de confusão. Essa matriz, que é quadrada, permite confrontar a quantificação dos padrões corretos efetuada em suas respectivas classes, linhas da matriz, e a quantificação dos padrões incorretos inseridos em classes diferentes das definidas como classes corretas, colunas da matriz (POLIDORIO, 2007).

Essa matriz tem a capacidade de destacar os conflitos entre as classes definidas e com isso, oferecer a exatidão global e o coeficiente *kappa* (CHUVIECO, 2002).

A exatidão global é a razão entre a soma dos valores da diagonal principal da matriz pelo número total de pixels utilizados (STORY; CONGALTON, 1986), dada por:

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ii}}{n} \quad (22)$$

onde:  $P_o$  é a exatidão global;  $x_{ii}$  são os elementos da diagonal principal (corretamente classificados);  $m$  é o número de classes presentes na matriz; e  $n$  é o número total de elementos amostrais.

De acordo com Chuvieco (2002), a exatidão global limita-se a analisar o que ocorre na diagonal da matriz, porém é de grande interesse analisar as relações múltiplas entre as classes distintas.

Conforme Rosenfield e Fitzpatrick-Lins (1986), o coeficiente *kappa* (também denominado KHAT ou KIA) é dado por:

$$\hat{K} = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (23)$$

onde:  $P_o$  é a proporção de plena concordância ou exatidão global; e  $P_c$  é a proporção de concordância por casualidade, que é calculada por:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{i+} * x_{+j})}{n^2} \quad (24)$$

dado que:  $m$  é o número de classes analisadas;  $x_{i+}$  e  $x_{+j}$  são os totais marginais da linha  $i$  e coluna  $j$ , respectivamente; e  $n$  é o número total de observações.

Segundo Moreira (2005), a vantagem do coeficiente *kappa* sobre a exatidão global é o fato de incluir no seu cálculo não somente os elementos da diagonal da matriz de erros, mas todos os elementos da matriz.

Landis e Koch (1977) apresentam uma relação entre o valor do coeficiente *kappa* e a qualidade da classificação utilizada para avaliar a qualidade do resultado obtido.

Tabela 03. Valor do coeficiente kappa associado ao desempenho da classificação.

| VALOR KAPPA | QUALIDADE |
|-------------|-----------|
| < 0,00      | Péssima   |
| 0,00 a 0,20 | Ruim      |
| 0,21 a 0,40 | Razoável  |
| 0,41 a 0,60 | Boa       |
| 0,61 a 0,80 | Muito boa |
| 0,81 a 1,00 | Excelente |

Fonte: adaptada de Landis e Koch (1997).

Mas, qual é o tamanho necessário da amostra para avaliar a qualidade do mapa temático?

De acordo com Chuvieco (2002), a estatística clássica pode oferecer tamanho da amostra, ou número necessário de pontos, muito pequeno se comparado ao total de pixels da imagem. Sendo assim, Hay (1979) e Congalton (1991) sugerem utilizar 50 pixels em cada classe temática na avaliação da qualidade do mapa temático.

### 3 MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 Material

Para a realização desse trabalho foram utilizados programas computacionais e imagens aéreas coletadas pelo Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais (SAAPI) da parceria entre UNESP e ENGEMAP. Esses itens estão detalhados a seguir:

- Imagem aérea na faixa do infravermelho, adquirida pela câmara digital SONY F-828 (8 megapixels);
- Imagem aérea na faixa do espectro do visível, adquirida pela câmara digital HASSELBLAD H3D (39 megapixels);
- Imagem aérea na faixa do espectro do visível, adquirida pela câmara digital FUJI FINEPIX S3 PRO (12 megapixels);
- Programa ENVI utilizado no processamento de imagem digital;
- Programa SPRING usado na transformação da imagem de sistema de cor RGB para sistema de cor HSI.
- Programa SURFER utilizado na análise de dados e representação de superfícies;
- Programa IDRISI usado no processamento de imagem digital e geração de matrizes de índices;
- Programa MATLAB utilizado na elaboração de programas para executar tarefas computacionais como análise numérica, cálculo com matrizes e outras;
- Programas de edição de texto, planilha eletrônica e representação gráfica.

### 3.2 Características das imagens aéreas

Nesse trabalho foram utilizadas imagens aéreas adquiridas pelas seguintes configurações do sistema de coleta do SAAPI:

- uma câmara HASSELBLAD H3D e uma câmara SONY F-828 utilizadas no voo realizado no município Tarumã (SP);
- duas câmaras FUJI FINEPIX S3 PRO e uma câmara SONY F-828 utilizadas no voo realizado no município Presidente Prudente (SP).

Na primeira configuração, foi utilizada a opção B (ver Tabela 01) sugerida por Ruy (2008). A câmara digital HASSELBLAD foi responsável pela aquisição das imagens aéreas na faixa do espectro do visível e a câmara SONY, pela aquisição das imagens aéreas infravermelhas.

As tomadas das câmaras foram sincronizadas pelo dispositivo de controle do SAAPI. A transferência das imagens das unidades de armazenamento das câmaras para o computador foi gerenciada pelo programa *Flexcolor* da Hasselblad.

As imagens não foram pré-processadas. Foram transferidas no formato *fff* e salvas nos formatos *tif* ou *jpg*.

Na segunda configuração, foi utilizada a opção C (ver Tabela 01) sugerida por Ruy (2008), porém as câmaras HASSELBLAD foram substituídas pelas câmaras FUJI. As imagens aéreas na faixa do espectro do visível foram adquiridas pelas câmaras FUJI e as imagens infravermelhas, pela câmara SONY.

### 3.3 Áreas de estudo

As áreas de estudo correspondem a uma parte das regiões cobertas pelas imagens aéreas, nas faixas do espectro do visível e do infravermelho, adquiridas pelo SAAPI durante os voos realizados nos municípios Tarumã (SP) e Presidente Prudente (SP).

As áreas de estudo contêm diferentes tipos de alvos, tais como: corpo d'água, sombra, via pavimentada, cobertura vegetal, solo exposto, telhado de edificação e outros.

A Figura 13 apresenta a área de estudo coberta pelas imagens aéreas do município de Tarumã.

Para representar a imagem infravermelha em composição colorida foi utilizado o seguinte artifício: os valores registrados no componente verde foram representados pela cor azul; os valores do componente vermelho foram representados pela cor verde; e aqueles valores do componente infravermelho, pela cor vermelha. A imagem conhecida como infravermelha falsa cor é o resultado desse artifício utilizado. Essas imagens foram tomadas com duas câmaras instaladas na mesma plataforma. Essa imagens foram registradas, reamostradas e combinadas. Informações mais detalhadas estão disponíveis em Lopes (2010).



Figura 13. Área de estudo Tarumã. (a) Imagem na faixa do visível. (b) Imagem infravermelha falsa cor.

A Figura 14 apresenta a área de estudo coberta pelas imagens aéreas do município de Presidente Prudente.

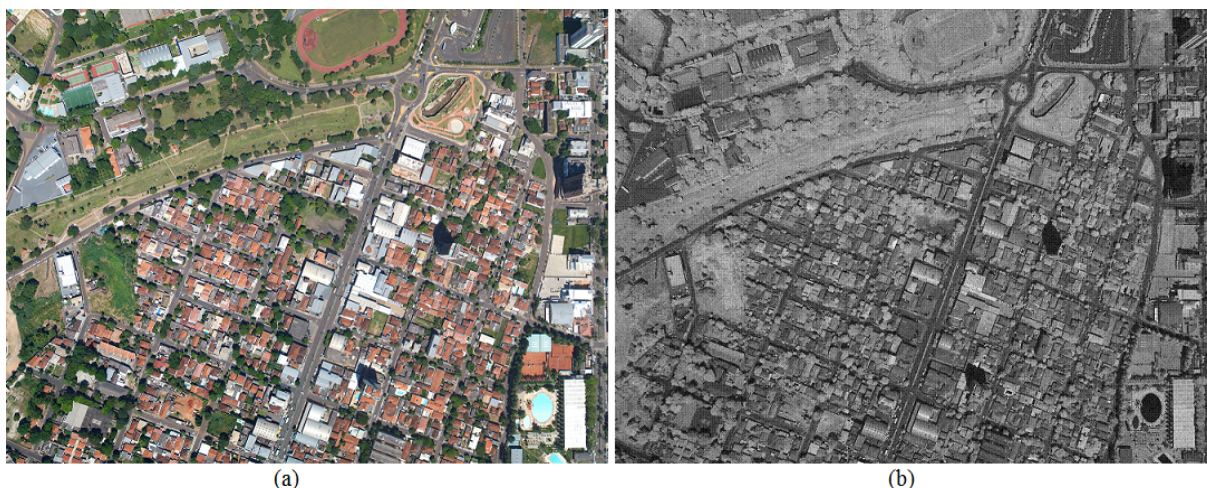


Figura 14 . Área de estudo Presidente Prudente. (a) Imagem na faixa do visível. (b) Imagem na faixa do infravermelho.

### 3.4 Metodologia

Para realizar o presente trabalho foi necessário aplicar, inicialmente, os índices e algoritmos desenvolvidos por Polidório (2007). Após aplicar os algoritmos de limiarização foi realizada uma avaliação visual do resultado obtido a fim de decidir sobre a necessidade de alterar índices e limiares. Desta forma, foram avaliados os resultados dos procedimentos propostos para verificar sua capacidade de identificar os alvos específicos como corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação presentes nas imagens aéreas adquiridas pelo SAAPI. Finalmente, modificações foram realizadas com base na análise dos resultados obtidos. Os resultados produzidos com a aplicação dos algoritmos aprimorados foram avaliados para conhecer a qualidade dos produtos.

A seguir são apresentadas as estruturas gerais dos procedimentos propostos para atingir os objetivos desse trabalho.

#### 3.4.1 Seleção da área de estudo

A seleção da área de estudo foi realizada com base na presença, nas imagens aéreas, dos seguintes alvos específicos: corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação.

### **3.4.2 Pré-processamento da imagem**

Devido à variação nos valores de brilho em função da distância do ponto ao centro da imagem conhecido como efeito vinhete, foi aplicada uma abordagem para determinar uma função polinomial capaz de corrigir o efeito vinhete da imagem da faixa do espectro do visível da área de trabalho Tarumã.

### **Processamento da imagem**

As imagens aéreas utilizadas nesse trabalho possuem resoluções espaciais diferentes e, portanto, foi necessário compatibilizá-las.

Na área de estudo Tarumã, a imagem infravermelha sofreu reamostragem e passou a ser representada com pixel na mesma dimensão espacial da imagem da faixa do espectro do visível. O método de interpolação utilizado foi o vizinho mais próximo. O registro das imagens foi realizado a partir do modelo de transformação polinomial com base nos pontos homólogos escolhidos nas imagens aéreas.

Na área de estudo Presidente Prudente, as imagens de cada câmara FUJI possuem diferenças radiométricas devido às diferenças de iluminação causadas pela inclinação de cada câmara. Antes de realizar a fusão, cada imagem é reamostrada para sua posição nadiral (retificada). Em resumo, as seguintes etapas são seguidas: calibração do sistema de câmaras, com a utilização de injunções de estabilidade de orientação relativa; definição de um conjunto adequado de parâmetros de orientação exterior para ambas as câmaras; retificação das imagens para um plano comum; registro entre as imagens retificadas e finalmente a correção radiométrica e a fusão das imagens. A imagem infravermelha sofreu reamostragem e passou a ser representada com pixel na mesma dimensão espacial da imagem da faixa do espectro do visível. Esses processamentos foram realizados por Lopes (2010).

### **Aplicação dos índices e algoritmos**

Os índices utilizados nesse trabalho foram adaptados do trabalho de Polidorio (2007). Esses índices serviram para ressaltar o comportamento espectral de alvos específicos como corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação presentes nas imagens aéreas adquiridas pelo SAAPL.

Os algoritmos propostos para a identificação de alvos específicos baseiam-se em operações aritméticas simples para produzir os resultados.

Também, foram utilizados operadores computacionais, operadores de conjunto, operadores lógicos, filtros e morfologia matemática disponíveis no programa MATLAB.

As matrizes de índices foram produzidas no programa IDRISI com base nas equações definidas para cada índice.

Alguns índices utilizaram os componentes do sistema de cor HSI. A transformação do sistema de cor RGB para o sistema de cor HSI foi realizada no programa SPRING.

### **Análise, ajuste e qualidade do resultado**

Os resultados obtidos a partir da aplicação dos algoritmos propostos foram observados e quando necessário, o ajuste nos procedimentos e limiares foi realizado. Esse ajuste foi acompanhado de propostas alternativas para alcançar resultados satisfatórios.

A verificação da qualidade dos resultados foi realizada utilizando a matriz de confusão. Foram extraídas dessa matriz a exatidão global e o coeficiente *kappa*.

#### 4 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Esse trabalho tem como base o estudo realizado por Polidório (2007) na área de reconhecimento de padrões. Os algoritmos e procedimentos de análise desenvolvidos por Polidório (2007) são capazes de realçar, nas imagens aéreas, os alvos específicos tais como vegetação, sombra, corpo d'água, vias pavimentadas, entre outros.

Inicialmente, a abordagem de Polidório (2007) foi aplicada às imagens aéreas utilizadas nesse trabalho. Em seguida, os resultados foram analisados e, quando necessário, foram propostos ajustes para melhorar os resultados.

A estratégia adotada baseia-se em uma combinação de indicadores da resposta espectral de alvos específicos. Nessa combinação são selecionados somente pixels cuja resposta possua uma elevada chance de corresponder ao alvo objeto de análise do procedimento.

Para diminuir a chance de erro na identificação, considera-se que pixels isolados possam ser identificados equivocadamente. Como critério, a remoção desses pixels é realizada pela aplicação de operadores morfológicos que consideram que somente pixels conectados com outros também identificados como parte da classe de interesse sejam de fato pertencentes a essa classe.

No que se refere à variação nos valores de brilho conhecido como efeito vinhete, é apresentada uma abordagem para determinar uma função polinomial capaz de minimizar esse efeito. Para isso, em um conjunto de elementos amostrais de sombra é realizado o ajuste de polinômio por método dos mínimos quadrados (MMQ) e em seguida é realizada a análise de variância para avaliar os modelos de polinômios.

Portanto, nesse capítulo são apresentados os detalhes dos procedimentos metodológicos definidos por Polidório (2007) para identificar corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação nas imagens das faixas do espectro do visível e do infravermelho; e a abordagem para determinar uma função polinomial capaz de corrigir o efeito vinhete.

#### 4.1 Abordagem para correção do efeito vinhete

A estimativa do grau de modificação da imagem devido ao efeito vinhete na imagem foi baseada na análise dos níveis de cinza dos componentes R, G e B das sombras com base no distanciamento do centro da imagem.

A sombra foi escolhida por apresentar três aspectos importantes: a) boa distribuição ao longo de toda a imagem; b) resposta espectral de valor baixo; c) efeito de iluminação indireta é aleatório.

Para correção desse efeito vinhete adota-se um modelo de regressão. O modelo de regressão é escolhido com base na análise de superfície de tendência realizada nos valores de sombras. Os valores de sombras são obtidos em duas estratégias: a primeira, dos componentes R, G e B da imagem aérea na faixa do espectro do visível; e a segunda estratégia, do componente I da imagem HSI obtida da transformação da imagem na faixa do espectro do visível.

Nesse caso, os valores são reunidos em um conjunto de elementos amostrais coletados, manualmente (no caso 265 elementos), com base em seleção visual no ponto mais central da sombra. Cada elemento amostral possui as posições L (linha) e C (coluna) do ponto que localizam cada elemento de sombra na imagem e os valores dos componentes R, G, B e I do ponto de sombra.

Após a coleta de dados, é realizado o ajuste de polinômio pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) para representar o fenômeno e em seguida, é realizada a análise de variância para avaliar os modelos de polinômios.

Para isso, partes dos valores necessários ao preenchimento da Tabela 02 são processados nos programas Surfer e Excel. Os valores de resíduos e os parâmetros de cada polinômio são obtidos no programa Surfer. As operações de cálculos referentes à soma dos quadrados, média dos quadrados e outras operações são realizadas no programa Excel.

Após realizadas as operações de cálculos, cada polinômio é submetido a um teste estatístico com base na distribuição F. Entre os polinômios validados, procura-se pelo polinômio de melhor ajuste com base nos testes de hipóteses descritos na fundamentação teórica.

Depois de encontrado o polinômio de melhor ajuste, aplica-se a correção do efeito vinhete com base na superfície de tendência selecionada, a partir de procedimentos realizados no programa Matlab. Esses procedimentos são descritos a seguir.

Uma matriz com o mesmo número de linhas e colunas da imagem que deve ser corrigida do efeito vinhete deve ser produzida como função do modelo de tendência selecionado. O valor de cada elemento dessa matriz é subtraído pelo valor máximo encontrado nessa matriz. O resultado dessa operação gera uma matriz com estimativas do valor de correção do efeito vinhete. Os elementos mais próximos ao centro dessa matriz terão valores baixos e os elementos mais distantes terão valores mais altos. Por fim, essa matriz é somada à imagem original, nesse caso, à imagem com efeito vinhete. Essa operação gera a imagem corrigida que deverá apresentar uma distribuição de valores que possam ser aceitos como estacionários, ou seja, livres de tendência espacial. Essa abordagem é similar ao processo de minimização da componente de tendência adotados em análise de séries temporais. Mais detalhes são encontrados em Morettin (2004).

## **4.2 Identificação de alvos em imagens do espectro do visível e do infravermelho**

Os procedimentos descritos nesse item foram desenvolvidos por Polidório (2007) e abordam as identificações de alvos específicos como vegetação, sombra, corpo d'água e vias pavimentadas. Esses procedimentos foram aplicados às imagens das faixas do espectro do visível e do infravermelho da área de estudo Tarumã.

As variações do número digital ND das imagens infravermelhas têm baixa correlação com os valores de ND da mesma posição das imagens da faixa do espectro do visível. Isto constitui uma importante fonte de informação para identificar os alvos específicos desse trabalho.

A seguir são mostrados os detalhes dos procedimentos para identificar corpo d'água, sombra, vias pavimentadas e vegetação.

### **4.2.1 Corpo d'água**

Para identificar corpos d'água são necessários os seguintes atributos: o componente matiz H do sistema de cor HSI, a matriz de índice mWI e a imagem infravermelha original. O componente matiz H é obtido a partir da transformação do sistema de cores RGB para o sistema HSI, ou seja, a imagem do espectro do visível é transformada numa nova imagem no sistema de cores HSI. Com esses atributos são realizados os procedimentos descritos a seguir.

### Computar a matriz B

A matriz B é a imagem binária na qual os valores associados a 1 correspondem aos valores maiores que 30% do valor máximo observado na matriz de índice mWI uma vez que seus valores originais são distribuídos no intervalo 0 a 1.

O valor de limiar de 30% foi dimensionado para evitar que algum corpo d'água fosse descartado. Ou seja, adota-se um valor de limiar capaz de garantir que todos pixels de corpos d'água sejam incluídos. Nesse processo, é possível que pixels de outros alvos também sejam incluídos, porém eles serão excluídos em um próximo processamento.

É importante que os valores originais da matriz de índice mWI sejam distribuídos no intervalo 0 a 1. Nesse caso, a matriz índice normalizada é chamada de  $mWI_{ij}^*$ .

Em resumo, a matriz B é gerada a partir da condição dada por:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } mWI_{ij}^* > 0,30 \max(mWI_{ij}^*) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

### Computar o vetor X

O vetor X contém os valores da associação entre a matriz B e a matriz de índice mWI com a aplicação da função de transformação de dimensão  $X = A_p(B, mWI)$ , definida no item 2.4.

Dos valores armazenados no vetor  $X$  são extraídos os seguintes itens utilizados nos próximos processamentos: média  $\mu_x$ , desvio padrão  $\sigma_x$ , valor máximo  $mx$  e valor mínimo  $mn$ .

### Computar a matriz $h$

A matriz  $h$  é a imagem binária na qual os valores associados a 1 correspondem aos valores do componente matiz  $H$  que são maiores que 0,10 e menores que 0,58. Com isto, é criada uma faixa de restrição no componente matiz  $H$ , que engloba tanto sombras mais escuras quanto sombras mais tênues, a qual não envolve corpo d'água.

Nesse intervalo de valores encontram-se principalmente sombras, pois a maior parte provém do espalhamento atmosférico.

É importante que os valores do componente matiz  $H$  sejam distribuídos no intervalo 0 a 1.

Em resumo, a matriz  $h$  é gerada a partir da condição definida como:

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } 0,10 < H_{ij} < 0,58 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

### Computar o valor $k$

A razão entre as medidas estatísticas, desvio padrão  $\sigma_x$  e média  $\mu_x$ , obtidas do vetor  $X$  estabelece o coeficiente de dispersão relativa do conjunto. Os alvos com similaridade alta apresentam valor baixo na razão entre o desvio padrão  $\sigma_x$  e a média  $\mu_x$ . Se isto ocorrer com a matriz de índice mWI significa que os alvos das classes sombra, via pavimentada e corpo d'água têm valores muito próximos. Então, nesse caso, separá-los é mais difícil.

O valor  $k$  é o grau de dificuldade definido na equação dada por:

$$k = 0,50 \left( \frac{\mu_x}{\sigma_x} \right) \quad (25)$$

onde: desvio padrão  $\sigma_x$  e média  $\mu_x$  são obtidos do vetor X produzido pela combinação de B com mWI.

Os valores de brilho relativos ao alvo corpo d'água, em geral, são baixos. Então, na expressão  $(mWI - NIR)$  a imagem infravermelha subtrai valores de todos alvos, mas no caso de pixels que representam corpo d'água os valores em ambas matrizes de índices são baixos enquanto para outros alvos os valores podem ser mais elevados. Nesse caso, valores baixos no resultado da expressão podem corresponder à resposta de água, caso contrário não há indicação adequada para a identificação desse alvo. Se na expressão, a imagem infravermelha for ponderada pelo valor k, então uma quantidade maior de pontos não associados com o alvo corpo d'água pode ser removida.

### Computar a matriz W

A matriz W é uma imagem binária que também contribui no processo de identificação do alvo corpo d'água. Os valores associados a 1 correspondem aos valores do resultado da expressão  $(mWI_{ij} - k(NIR_{ij}))$  maiores que zero. Em resumo, a matriz W é gerada a partir da condição definida como:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (mWI_{ij} - k(NIR_{ij})) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

### Computar a matriz wrt

A matriz wrt é a imagem binária que representa os corpos d'água. Sua equação é dada por:

$$wrt_{ij} = \gamma_B(W_{ij} \cap h_{ij}) \quad (26)$$

onde:  $\gamma_B$  representa o operador morfológico de abertura.

Essa equação aplica a interseção entre os resultados obtidos nas matrizes  $W$  e  $h$ . Eventuais pontos isolados são erroneamente identificados como corpo d'água, então são aplicados os operadores morfológicos erosão, para remover os pontos errados, e dilatação, para reconstituir as áreas de interesse danificadas pela erosão, os quais são representados pelo operador morfológico de abertura ( $\gamma_B$ ).

#### 4.2.2 Sombra

Para identificar os alvos da classe sombra são necessários os seguintes atributos: as matrizes de índices NDVI, nSI e sSI; a imagem infravermelha original e a matriz  $wrt$ .

Os valores da imagem infravermelha devem estar distribuídos no intervalo 0 a 1 e não devem sofrer quaisquer alterações nos valores de brilho.

Com esses atributos são realizados os procedimentos descritos a seguir.

#### Computar a matriz $sw$

A matriz  $sw$  é uma imagem binária que contribui no processo de identificação do alvo sombra. Os valores associados a 1 correspondem aos valores que satisfazem a condição dada por:

$$sw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} > NIR_{ij}) \text{ ou } (\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

Em geral, boa parte das sombras é identificada na expressão  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$ . Porém, há alguns tipos que só são identificados na expressão  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0$ .

### Computar a matriz shd

A matriz shd é uma imagem binária que representa a matriz final de identificação do alvo sombra. A condição que determina a matriz shd é dada por:

$$shd_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (sw_{ij} - wrt_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

O processo de geração da matriz sw pode incluir o alvo corpo d'água como sendo sombra. Então, a expressão  $(sw_{ij} - wrt_{ij})$ , representada pelo operador diferença, é utilizada para garantir a exclusão desse alvo, corpo d'água, identificado indevidamente.

### 4.2.3 Via pavimentada

Para identificar os alvos da classe via pavimentada são necessários os seguintes atributos: as matrizes de índices nRI, mWI e WWI; e a matriz shd que representa a identificação do alvo sombra.

As matrizes de índices utilizadas são as que apresentam valores de respostas mais elevados e mais estáveis na identificação de via pavimentada. Porém, algumas sombras podem ser incluídas no processo de identificação de vias pavimentadas. Nesse caso, a matriz shd é utilizada para excluir as sombras identificadas, erradamente, como via pavimentada.

Os procedimentos descritos a seguir utilizam os atributos necessários para identificar vias pavimentadas.

### Computar a matriz $rd$

É o procedimento que produz a matriz obtida da combinação da resposta das três matrizes de índices  $nRI$ ,  $mWI$  e  $WWI$ . A equação que define a matriz  $rd$  é dada por:

$$rd_{ij} = nRI_{ij} + mWI_{ij} + WWI_{ij} \quad (27)$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

Nessa equação, a soma destes índices promove um grande realce nos alvos das classes corpo d'água, via pavimentada, sombra e alguns artefatos que representam alvos que não são vias pavimentadas.

### Computar a matriz $B$

A matriz  $B$  é uma imagem binária produzida pela associação do valor 1 aos valores da matriz  $rd$  maiores que 0. Como o menor valor verificado na matriz  $rd$  para via pavimentada foi 0, logo os alvos da classe via pavimentada são incluídos na matriz  $B$  a partir da condição  $rd_{ij} > 0$ .

Em resumo, a matriz  $B$  é gerada a partir da condição definida como:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

### Computar o vetor $X$

O vetor  $X$  contém os valores da relação entre as matrizes  $B$  e  $rd$  combinados com base na função de transformação de dimensão  $X = A_p(B, rd)$ , definida no item 2.4.

Dos valores armazenados no vetor  $X$  é calculada a média  $\mu_x$  utilizada nos próximos processamentos.

### Computar a matriz $rod^1$

Essa é a matriz binária na qual os valores associados a 1 correspondem aos valores da matriz  $rd$  menores que  $(mx - \sigma_x)$ . Em resumo, a matriz  $rod^1$  é produzida a partir da condição definida como:

$$rod_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} < (mx - \sigma_x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ ; valor máximo  $mx$  e desvio padrão  $\sigma_x$  obtidos do vetor  $X$  produzido pela combinação de  $B$  com  $rd$ .

O limiar  $(mx - \sigma_x)$  definido na condição deve ser suficiente para eliminar os alvos não desejados. Assim, a matriz  $rod^1$  representa a primeira eliminação de parte dos alvos que não são vias pavimentadas, que nesse caso são as sombras e os corpos d'água.

Esse valor de limiar pode variar de uma cena para outra. Essa flexibilidade auxilia no processo de reconhecimento de vias pavimentadas, pois o valor do limiar pode variar devido ao material utilizado na via.

### Computar a matriz $rod^2$

Essa é a imagem binária na qual os valores associados a 1 correspondem aos valores da matriz  $rd$  maiores que  $(mn + \sigma_x)$ . Em resumo, a matriz  $rod^2$  é gerada a partir da condição definida como:

$$rod_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} > (mn + \sigma_x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ ; valor mínimo  $mn$  e desvio padrão  $\sigma_x$  obtidos do vetor  $X$  produzido pela combinação de  $B$  com  $rd$ .

O limiar  $(mn + \sigma_x)$  definido na condição deve ser suficiente para eliminar os alvos não desejados. Sendo assim, a matriz  $rod^2$  representa a segunda eliminação de parte dos alvos que não são vias pavimentadas, que nesse caso são os artefatos.

### Computar a matriz rod

É a imagem binária que representa os alvos da classe via pavimentada. A equação que determina a matriz  $rod$  é dada por:

$$rod_{ij} = (rod_{ij}^1 \cap rod_{ij}^2) - shd_{ij} \quad (28)$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

A equação que define a matriz  $rod$  utiliza operadores de conjunto, interseção e diferença, para identificar as vias pavimentadas. A interseção é aplicada entre as matrizes  $rod^1$  e  $rod^2$ . Entretanto, após aplicar a interseção é possível que algumas sombras ainda estejam presentes no resultado. Então, para garantir a exclusão do alvo sombra identificado indevidamente é aplicada a diferença entre o resultado obtido na expressão  $(rod_{ij}^1 \cap rod_{ij}^2)$  e a matriz  $shd$ .

#### 4.2.4 Vegetação

Para identificar o alvo vegetação é preciso usar os seguintes atributos: as matrizes de índices NDVI e WWI, a imagem infravermelha original e as matrizes  $shd$  e  $wrt$ .

No processo de identificação do alvo vegetação, as matrizes de índices utilizadas são as que apresentam grande vigor no realce desse alvo. Mas, outros alvos como sombra e corpo d'água são também realçados. Nesse caso, as matrizes shd e wtr são utilizadas para excluir os alvos sombra e corpo d'água, respectivamente.

Os procedimentos descritos a seguir utilizam os atributos necessários para identificar vegetação.

### Computar a matriz V

A matriz V é a imagem binária na qual os valores associados a 1 correspondem aos valores maiores que 0 encontrados na soma entre as matrizes de índices NDVI e WWI e a imagem infravermelha original. Em resumo, a matriz V é gerada a partir da condição definida como:

$$V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} + WWI_{ij} + \frac{1}{2}NIR_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

### Computar a matriz vgt

Essa é a imagem binária que representa os alvos da classe vegetação. Essa imagem tem como base os operadores de conjunto, diferença e união, e é determinada pela equação definida por:

$$vgt_{ij} = V_{ij} - (shd_{ij} \cup wrt_{ij}) \quad (29)$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

Na matriz V é possível que os alvos das classes sombra e corpo d'água sejam identificados como vegetação. Então, esses alvos são reunidos, através do operador de

união, e em seguida, são excluídos do processo de identificação através do operador de diferença.

#### 4.2.5 Verificação da qualidade do resultado da identificação de alvos

Para verificar a qualidade do resultado obtido é utilizada a matriz de erros, também conhecida como matriz de confusão. A Tabela 04 apresenta a distribuição matricial das classes pertencentes ao plano de referência e plano classificado na matriz de confusão.

Tabela 04. Matriz de confusão.

|                    |           | PLANO DE REFERÊNCIA |           |               |
|--------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------|
|                    |           | Classe 01           | Classe 02 | Total         |
| PLANO CLASSIFICADO | Classe 01 | $X_{11}$            | $X_{21}$  | $X_{1+}$      |
|                    | Classe 02 | $X_{12}$            | $X_{22}$  | $X_{2+}$      |
|                    | Total     | $X_{+1}$            | $X_{+2}$  | $\sum X_{ij}$ |

Fonte: adaptada de Chuvieco (2002).

onde:  $X_{ij}$  é o valor da classe na linha  $i$  e coluna  $j$ ;  $X_{i+}$  é o valor total marginal da linha  $i$ ; e  $X_{+j}$  é o valor total marginal da coluna  $j$ .

O procedimento é lançar 3 conjuntos de amostras, cada qual com 100 elementos amostrais, numa área da imagem. Essa área, de dimensão 400 por 400 pixels, é dividida numa malha regular de quadrículas de 5 linhas por 5 colunas. Para garantir que os pontos não formem agrupamentos cada quadrícula recebe 4 pontos distribuídos aleatoriamente, com espaçamento mínimo de 15 pixels entre os pontos.

É importante ressaltar que a escolha de 100 elementos amostrais deve-se ao fato da utilização de 50 pixels por cada classe temática, definida no item 2.12. Pois, o resultado final será uma imagem binária, logo duas classes serão produzidas.

Os valores tanto da classe de referência como da classe obtida pelo processo de reconhecimento são computados para preencher a matriz de confusão e dela são calculados a exatidão global e o coeficiente *kappa*.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os métodos abordados nesse trabalho foram capazes de realçar, nas imagens aéreas, os seguintes tipos de alvos: vegetação, sombra, corpo d'água e vias pavimentadas.

Inicialmente, os métodos desenvolvidos por Polidorio (2007) foram aplicados às imagens aéreas utilizadas nesse trabalho. Em seguida, os resultados foram analisados e, quando necessário, foram propostos ajustes para melhorar os resultados.

Os resultados foram mostrados através de imagens binárias. Nas imagens, o valor 1 foi associado ao 255 (branco) e o valor 0 ao 0 (preto). Os valores binários, 0 e 1, foram utilizados nas condições definidas em cada procedimento de identificação dos alvos específicos.

A seguir serão descritos as análises e os ajustes aplicados aos algoritmos para a identificação dos alvos específicos; e a análise do resultado da correção do efeito vinhete.

### 5.1 Análise do resultado da correção do efeito vinhete

O efeito vinhete foi verificado na imagem da faixa do espectro do visível, utilizada na área de estudo Tarumã, como pode ser visto no gráfico da Figura 15. Nesse gráfico foram representados os valores digitais (ND) de cada componente espectral correspondente às cores azul, verde e vermelho de pixels de sombra em função da distância ao centro da cena.

O gráfico apresentou valores de brilho elevados nas sombras mais próximas do centro da imagem e à medida que as sombras se afastam do centro da imagem há um decréscimo nos valores de brilho das sombras. Foi observado que as linhas de tendência aplicadas aos componentes R, G e B apresentam inclinações negativas muito acentuadas.

Cada polinômio foi validado através da análise de variância. Todos apresentaram valores de  $F_c$  maiores que zero. A Tabela 05 mostra os resultados obtidos na validação dos polinômios.

A escolha do melhor polinômio dos componentes R, G, B e I foi realizada com base nos resultados da Tabela 06, Tabela 07, Tabela 08 e Tabela 09.

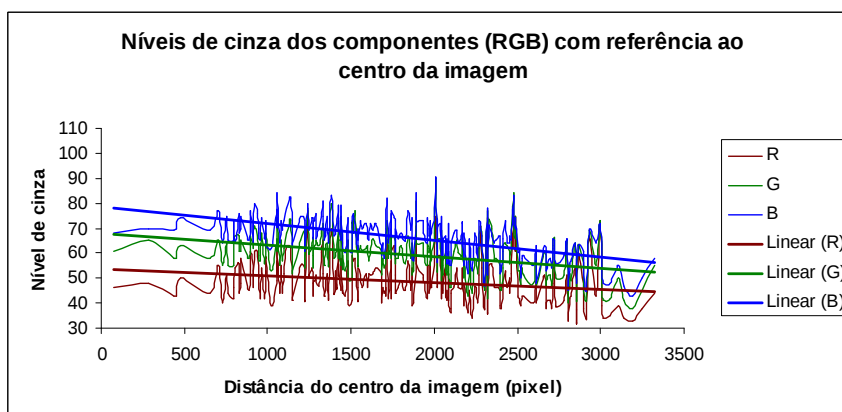


Figura 15. Análise do efeito vinhete.

Tabela 05. Validação dos polinômios dos componentes R, G, B e I.

| COMPONENTE | FONTE DE VARIAÇÃO | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$      |
|------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|------------|
| R          | Linear            | 8260,298359        | 2                 | 4130,149180         | 142,891232 |
|            | Resíduos          | 7572,886546        | 262               | 28,904147           |            |
|            | Total             | 15833,184906       | 264               | 59,974185           |            |
|            | Bilinear          | 9319,989175        | 3                 | 3106,663058         | 124,491738 |
|            | Resíduos          | 6513,195731        | 261               | 24,954773           |            |
|            | Total             | 15833,184906       | 264               | 59,974185           |            |
|            | Quadrática        | 10473,251612       | 5                 | 2094,650322         | 101,216639 |
|            | Resíduos          | 5359,933294        | 259               | 20,694723           |            |
|            | Total             | 15833,184906       | 264               | 59,974185           |            |
|            | Cúbica            | 10975,502193       | 9                 | 1219,500244         | 64,016648  |
|            | Resíduos          | 4857,682713        | 255               | 19,049736           |            |
|            | Total             | 15833,184906       | 264               | 59,974185           |            |

|   |            |              |     |             |            |
|---|------------|--------------|-----|-------------|------------|
| G | Linear     | 7985,726322  | 2   | 3992,863161 | 143,025546 |
|   | Resíduos   | 7314,288772  | 262 | 27,917133   |            |
|   | Total      | 15300,015094 | 264 | 57,954603   |            |
|   | Bilinear   | 8127,716758  | 3   | 2709,238919 | 98,589228  |
|   | Resíduos   | 7172,298336  | 261 | 27,480070   |            |
|   | Total      | 15300,015094 | 264 | 57,954603   |            |
|   | Quadrática | 10821,555794 | 5   | 2164,311159 | 125,167285 |
|   | Resíduos   | 4478,459300  | 259 | 17,291349   |            |
|   | Total      | 15300,015094 | 264 | 57,954603   |            |
|   | Cúbica     | 10923,543855 | 9   | 1213,727095 | 70,719169  |
|   | Resíduos   | 4376,471240  | 255 | 17,162632   |            |
|   | Total      | 15300,015094 | 264 | 57,954603   |            |
| B | Linear     | 6559,251044  | 2   | 3279,625522 | 87,405000  |
|   | Resíduos   | 9830,809334  | 262 | 37,522173   |            |
|   | Total      | 16390,060377 | 264 | 62,083562   |            |
|   | Bilinear   | 6567,739654  | 3   | 2189,246551 | 58,172948  |
|   | Resíduos   | 9822,320723  | 261 | 37,633413   |            |
|   | Total      | 16390,060377 | 264 | 62,083562   |            |
|   | Quadrática | 11555,817798 | 5   | 2311,163560 | 123,823195 |
|   | Resíduos   | 4834,242579  | 259 | 18,665029   |            |
|   | Total      | 16390,060377 | 264 | 62,083562   |            |
|   | Cúbica     | 11944,416515 | 9   | 1327,157391 | 76,125111  |
|   | Resíduos   | 4445,643862  | 255 | 17,433897   |            |
|   | Total      | 16390,060377 | 264 | 62,083562   |            |
| I | Linear     | 0,166909     | 2   | 0,083455    | 157,525906 |
|   | Resíduos   | 0,138803     | 262 | 0,000530    |            |
|   | Total      | 0,305712     | 264 | 0,001158    |            |
|   | Bilinear   | 0,178288     | 3   | 0,059429    | 121,726941 |
|   | Resíduos   | 0,127425     | 261 | 0,000488    |            |
|   | Total      | 0,305712     | 264 | 0,001158    |            |
|   | Quadrática | 0,219270     | 5   | 0,043854    | 131,395753 |
|   | Resíduos   | 0,086442     | 259 | 0,000334    |            |
|   | Total      | 0,305712     | 264 | 0,001158    |            |
|   | Cúbica     | 0,226858     | 9   | 0,025206    | 81,512628  |
|   | Resíduos   | 0,078854     | 255 | 0,000309    |            |
|   | Total      | 0,305712     | 264 | 0,001158    |            |

Tabela 06. Escolha do melhor polinômio do componente R.

| FONTE DE VARIAÇÃO | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$       | $F_t$ |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-------|
| Linear            | 8260,298359        | 2                 | 4130,14918          | 142,8912316 | 3,881 |
| Resíduos          | 7572,886546        | 262               | 28,90414712         |             |       |
| Bilinear          | 9319,989175        | 3                 | 3106,663058         | 124,4917383 |       |
| Resíduos          | 6513,195731        | 261               | 24,95477291         |             |       |
| Incremento        | 1059,690816        | 1                 | 1059,690816         | 42,46445437 |       |
| Total             | 15833,18491        | 264               | 59,97418525         |             |       |
| Bilinear          | 9319,989175        | 3                 | 3106,663058         | 124,4917383 | 3,033 |
| Resíduos          | 6513,195731        | 261               | 24,95477291         |             |       |
| Quadrática        | 10473,25161        | 5                 | 2094,650322         | 101,216639  |       |
| Resíduos          | 5359,933294        | 259               | 20,69472314         |             |       |
| Incremento        | 1153,262437        | 2                 | 576,6312183         | 27,86368362 |       |
| Total             | 15833,18491        | 264               | 59,97418525         |             |       |
| Quadrática        | 10473,25161        | 5                 | 2094,650322         | 101,216639  | 2,409 |
| Resíduos          | 5359,933294        | 259               | 20,69472314         |             |       |
| Cúbica            | 10975,50219        | 9                 | 1219,500244         | 64,01664755 |       |
| Resíduos          | 4857,682713        | 255               | 19,04973613         |             |       |
| Incremento        | 502,2505814        | 4                 | 125,5626453         | 6,591306278 |       |
| Total             | 15833,18491        | 264               | 59,97418525         |             |       |

Com base nos resultados mostrados na Tabela 06, três situações de análises entre os polinômios foram consideradas: (1) Linear e Bilinear, valor de  $F_c$  (42,644) maior que  $F_t$  (3,881); (2) Bilinear e Quadrático, valor de  $F_c$  (27,863) maior que  $F_t$  (3,033); e (3) Quadrático e Cúbico, valor de  $F_c$  (6,591) maior que  $F_t$  (2,409). Os valores de  $F_t$  correspondem aos valores críticos ao nível de 5% de probabilidade da distribuição F de Fisher-Snedecor (ver Anexo A).

Nas três situações o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio de menor grau para o polinômio de maior grau ser maior que  $F_t$ , rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a alternativa  $H_1$ , de que é significativa a diferença dada pelo incremento devido à adoção de uma superfície de tendência de maior ordem polinomial. Nesse caso, os resultados mostram uma tendência cúbica para os dados do componente R.

Tabela 07. Escolha do melhor polinômio do componente G.

| FONTE DE VARIAÇÃO | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$       | $F_t$ |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-------|
| Linear            | 7985,726322        | 2                 | 3992,863161         | 143,0255464 | 3,881 |
| Resíduos          | 7314,288772        | 262               | 27,91713272         |             |       |
| Bilinear          | 8127,716758        | 3                 | 2709,238919         | 98,58922828 |       |
| Resíduos          | 7172,298336        | 261               | 27,48007025         |             |       |
| Incremento        | 141,9904363        | 1                 | 141,9904363         | 5,167033236 |       |
| Total             | 15300,01509        | 264               | 57,95460263         |             |       |
| Bilinear          | 8127,716758        | 3                 | 2709,238919         | 98,58922828 | 3,033 |
| Resíduos          | 7172,298336        | 261               | 27,48007025         |             |       |
| Quadrática        | 10821,55579        | 5                 | 2164,311159         | 125,1672847 |       |
| Resíduos          | 4478,4593          | 259               | 17,29134865         |             |       |
| Incremento        | 2693,839036        | 2                 | 1346,919518         | 77,89557341 |       |
| Total             | 15300,01509        | 264               | 57,95460263         |             |       |
| Quadrática        | 10821,55579        | 5                 | 2164,311159         | 125,1672847 | 2,409 |
| Resíduos          | 4478,4593          | 259               | 17,29134865         |             |       |
| Cúbica            | 10923,54385        | 9                 | 1213,727095         | 70,719169   |       |
| Resíduos          | 4376,47124         | 255               | 17,16263231         |             |       |
| Incremento        | 101,9880604        | 4                 | 25,49701509         | 1,48561215  |       |
| Total             | 15300,01509        | 264               | 57,95460263         |             |       |

Com base nos resultados mostrados na Tabela 07, três situações de análises entre os polinômios foram consideradas: (1) Linear e Bilinear, valor de  $F_c$  (5,167) maior que  $F_t$  (3,881); (2) Bilinear e Quadrático, valor de  $F_c$  (77,895) maior que  $F_t$  (3,033); e (3) Quadrático e Cúbico, valor de  $F_c$  (1,485) menor que  $F_t$  (2,409). Os valores de  $F_t$  correspondem ao nível de 5% de probabilidade da distribuição F de Fisher-Snedecor (ver Anexo A).

Nas situações (1) e (2), o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio de menor grau para o polinômio de maior grau ser maior que  $F_t$ , rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a alternativa  $H_1$ , de que é significativa a diferença dada pelo incremento de maior ordem polinomial. Na situação (3), o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio

quadrático para o polinômio cúbico ser menor que  $F_t$ , aceita-se a hipótese nula  $H_0$  de que é insignificante a diferença dada pelo incremento de maior ordem polinomial. Nesse caso, os resultados mostram uma tendência quadrática para os dados do componente G.

Tabela 08. Escolha do melhor polinômio do componente B.

| FONTE DE VARIAÇÃO | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$       | $F_t$ |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-------|
| Linear            | 6559,251044        | 2                 | 3279,625522         | 87,40499969 | 3,881 |
| Resíduos          | 9830,809334        | 262               | 37,52217303         |             |       |
| Bilinear          | 6567,739654        | 3                 | 2189,246551         | 58,17294772 |       |
| Resíduos          | 9822,320723        | 261               | 37,63341273         |             |       |
| Incremento        | 8,488610381        | 1                 | 8,488610381         | 0,225560473 |       |
| Total             | 16390,06038        | 264               | 62,08356204         |             |       |
| Linear            | 6559,251044        | 2                 | 3279,625522         | 87,40499969 | 2,642 |
| Resíduos          | 9830,809334        | 262               | 37,52217303         |             |       |
| Quadrática        | 11555,8178         | 5                 | 2311,16356          | 123,8231951 |       |
| Resíduos          | 4834,242579        | 259               | 18,66502926         |             |       |
| Incremento        | 4996,566754        | 3                 | 1665,522251         | 89,2322336  |       |
| Total             | 16390,06038        | 264               | 62,08356204         |             |       |
| Quadrática        | 11555,8178         | 5                 | 2311,16356          | 123,8231951 | 2,409 |
| Resíduos          | 4834,242579        | 259               | 18,66502926         |             |       |
| Cúbica            | 11944,41652        | 9                 | 1327,157391         | 76,12511148 |       |
| Resíduos          | 4445,643862        | 255               | 17,4338975          |             |       |
| Incremento        | 388,5987171        | 4                 | 97,14967927         | 5,572459014 |       |
| Total             | 16390,06038        | 264               | 62,08356204         |             |       |

Com base nos resultados mostrados na Tabela 08, três situações de análises entre os polinômios foram consideradas: (1) Linear e Bilinear, valor de  $F_c$  (0,225) menor que  $F_t$  (3,881); (2) Linear e Quadrático, valor de  $F_c$  (89,232) maior que  $F_t$  (2,642); e (3) Quadrático e Cúbico, valor de  $F_c$  (5,572) maior que  $F_t$  (2,409). Os valores de  $F_t$  correspondem ao nível de 5% de probabilidade da distribuição F de Fisher-Snedecor (ver Anexo A).

Na situação (1), o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio linear para o polinômio bilinear ser menor que  $F_t$ , aceita-se a hipótese nula  $H_0$  de que é

insignificante a diferença dada pelo incremento de maior ordem polinomial. Nas situações (2) e (3), o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio de menor grau para o polinômio de maior grau ser maior que  $F_t$ , rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a alternativa  $H_1$ , de que é significativa a diferença dada pelo incremento de maior ordem polinomial. Nesse caso, os resultados mostram uma tendência cúbica para os dados do componente B.

Tabela 09. Escolha do melhor polinômio do componente I.

| FONTE DE VARIAÇÃO | SOMA DOS QUADRADOS | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA DOS QUADRADOS | $F_c$      | $F_t$ |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|------------|-------|
| Linear            | 0,166909           | 2                 | 0,083455            | 157,525906 | 3,881 |
| Resíduos          | 0,138803           | 262               | 0,000530            |            |       |
| Bilinear          | 0,178288           | 3                 | 0,059429            | 121,726941 |       |
| Resíduos          | 0,127425           | 261               | 0,000488            |            |       |
| Incremento        | 0,011378           | 1                 | 0,011378            | 23,306144  |       |
| Total             | 0,305712           | 264               | 0,001158            |            |       |
| Bilinear          | 0,178288           | 3                 | 0,059429            | 121,726941 | 3,033 |
| Resíduos          | 0,127425           | 261               | 0,000488            |            |       |
| Quadrática        | 0,219270           | 5                 | 0,043854            | 131,395753 |       |
| Resíduos          | 0,086442           | 259               | 0,000334            |            |       |
| Incremento        | 0,040982           | 2                 | 0,020491            | 61,395703  |       |
| Total             | 0,305712           | 264               | 0,001158            |            |       |
| Quadrática        | 0,219270           | 5                 | 0,043854            | 131,395753 | 2,409 |
| Resíduos          | 0,086442           | 259               | 0,000334            |            |       |
| Cúbica            | 0,226858           | 9                 | 0,025206            |            |       |
| Resíduos          | 0,078854           | 255               | 0,000309            |            |       |
| Incremento        | 0,007588           | 4                 | 0,001897            | 6,134517   |       |
| Total             | 0,305712           | 264               | 0,001158            |            |       |

Com base nos resultados mostrados na Tabela 09, três situações de análises entre os polinômios foram consideradas: (1) Linear e Bilinear, valor de  $F_c$  (23,306) maior que  $F_t$  (3,881); (2) Bilinear e Quadrático, valor de  $F_c$  (61,395) maior que  $F_t$  (3,033); e (3) Quadrático e Cúbico, valor de  $F_c$  (6,134) maior que  $F_t$  (2,409). Os valores de  $F_t$  correspondem ao nível de 5% de probabilidade da distribuição F de Fisher-Snedecor (ver Anexo A).

Nas três situações o valor de  $F_c$ , devido ao incremento do polinômio de menor grau para o polinômio de maior grau ser maior que  $F_t$ , rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e aceita-se a alternativa  $H_1$ , de que é significativa a diferença dada pelo incremento de maior ordem polinomial. Nesse caso, os resultados mostram uma tendência cúbica para os dados do componente I.

Por fim, para o procedimento de ajuste da superfície de tendência, foram utilizados os seguintes polinômios: cúbico, para os componentes R, B e I; e quadrático, para o componente G. Os coeficientes e os polinômios das superfícies são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 10. Coeficientes e polinômio dos componentes R, G, B e I.

| REGRESSÃO SUPERFÍCIE                                                                                                                       |                          |                              |                          |                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Equação Quadrática: $Z(X,Y) = A_{00} + A_{01}Y + A_{02}Y^2 + A_{10}X + A_{11}XY + A_{20}X^2$                                               |                          |                              |                          |                          |
| Equação Cúbica: $Z(X,Y) = A_{00} + A_{01}Y + A_{02}Y^2 + A_{03}Y^3 + A_{10}X + A_{11}XY + A_{12}XY^2 + A_{20}X^2 + A_{21}X^2Y + A_{30}X^3$ |                          |                              |                          |                          |
| COEFICIENTE                                                                                                                                | CÚBICA<br>(COMPONENTE R) | QUADRÁTICA<br>(COMPONENTE G) | CÚBICA<br>(COMPONENTE B) | CÚBICA<br>(COMPONENTE I) |
| $A_{00}$                                                                                                                                   | 65,515420907866          | 64,903625683283              | 62,113004902524          | 0,3031070497209          |
| $A_{01}$                                                                                                                                   | -0,01105934435           | -0,0004929859117             | 0,0046750368534          | -4,74229000E-05          |
| $A_{02}$                                                                                                                                   | -8,80047508E-07          | -1,5777965265E-06            | -3,833738932E-06         | -1,18022567E-09          |
| $A_{03}$                                                                                                                                   | 6,056729355E-10          | NE                           | 7,0165431234E-10         | 1,547818756E-12          |
| $A_{10}$                                                                                                                                   | 0,0001012894280          | 0,00346443903571             | 0,00998950613728         | -4,47756448E-06          |
| $A_{11}$                                                                                                                                   | 4,22377784110E-06        | 8,8180664135E-07             | -2,588297445E-07         | 2,049326896E-08          |
| $A_{12}$                                                                                                                                   | -9,1402825407E-10        | NE                           | -5,725251225E-10         | -3,50423974E-12          |
| $A_{20}$                                                                                                                                   | -1,6199737408E-06        | -1,2598099034E-06            | -2,156593457E-06         | -4,04944134E-09          |
| $A_{21}$                                                                                                                                   | 4,54008924967E-11        | NE                           | 4,0589910665E-10         | -5,51003562E-13          |
| $A_{30}$                                                                                                                                   | 9,37429328927E-11        | NE                           | -2,773456476E-11         | 3,395717050E-14          |

Os coeficientes que receberam NE (Não Existe) correspondem aos coeficientes que na equação quadrática não existem.

Os elementos Y e X são valores posicionais que seguem a configuração do programa Matlab. O elemento Y representa a posição L (linha) na imagem, com origem no canto superior esquerdo e crescente para baixo. O elemento X representa a posição C (coluna) na imagem, com origem no canto superior esquerdo e crescente para a direita. Onde Y e X são os números do conjunto  $Z^+$ , excluindo o zero, ou seja,  $Z^+ = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$ .

Para correção desse efeito vinhete adota-se um modelo de regressão. O modelo de regressão é escolhido com base na análise de superfície de tendência realizada nos valores de sombras. Os valores de sombras são obtidos em duas estratégias: a primeira, dos componentes R, G e B da imagem aérea na faixa do espectro do visível; e a segunda estratégia, do componente I da imagem HSI obtida da transformação da imagem na faixa do espectro do visível.

Nas duas estratégias, o resultado final foi a imagem ajustada com o valor da diferença entre o valor estimado em cada posição e o valor máximo.

A Figura 16(b) apresenta a imagem ajustada com o valor máximo do polinômio aplicado aos componentes R, G e B (primeira estratégia).



Figura 16. Correção do efeito vinhete na primeira estratégia. (a) Imagem no espectro do visível. (b) Imagem ajustada com o valor máximo do polinômio aplicado aos componentes R, G e B.

O gráfico da Figura 17 foi criado para verificar a correção do efeito vinhete. O gráfico apresentou uma constância nos valores de brilho das sombras à medida que elas se afastam do centro da imagem. Foi observado que as linhas de tendência com inclinações negativas muito acentuadas foram suavizadas após a aplicação da primeira estratégia para correção do efeito vinhete.

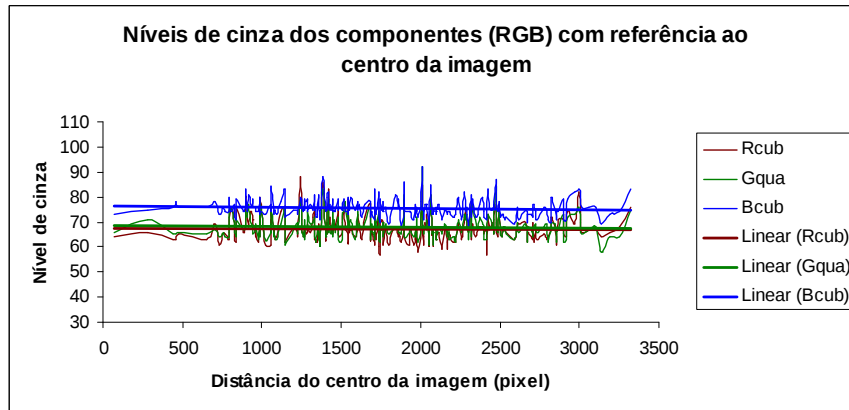


Figura 17. Análise da correção do efeito vinhete na primeira estratégia.

A Figura 18(b) apresenta a imagem convertida após o ajuste com o valor máximo do polinômio aplicado ao componente I (segunda estratégia). Nesse caso, após aplicar o ajuste no componente I, a imagem HSI foi convertida em imagem RGB. Dessa imagem convertida, foram utilizados os valores de R, G e B para produzir o gráfico da Figura 19 e verificar a correção do efeito vinhete.



Figura 18. Correção do efeito vinhete na segunda estratégia. (a) Imagem no espectro do visível. (b) Imagem convertida após o ajuste com o valor máximo do polinômio aplicado ao componente I.

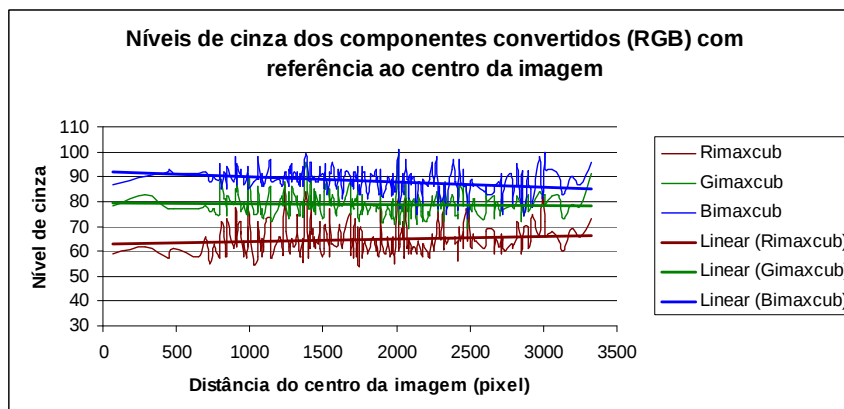


Figura 19. Análise da correção do efeito vinhete na segunda estratégia.

O gráfico da Figura 19 apresentou uma constância nos valores de brilho das sombras à medida que elas se afastam do centro da imagem. Foi observado que as linhas de tendência com inclinações negativas muito acentuadas foram suavizadas após a aplicação da segunda estratégia para correção do efeito vinhete.

## 5.2 Análise e ajuste do resultado da identificação da área de estudo Tarumã

Os resultados foram obtidos por modelos matemáticos, de fácil entendimento, que utilizam combinações entre os índices de realce utilizados nesse trabalho. Foram apresentados dois tipos de resultados:

- (a) resultado obtido a partir da aplicação dos procedimentos desenvolvidos por Polidorio (2007);
- (b) resultado obtido após a aplicação dos ajustes para melhorar o resultado do item (a).

Para facilitar o entendimento, o resultado do tipo (a) foi chamado de imagem obtida a partir dos procedimentos sem ajustes e o do tipo (b), de imagem obtida a partir dos procedimentos com ajustes.

### Identificação de corpo d'água

Os procedimentos definidos por Polidório (2007) mostraram que a representação de 30% (0,30) do valor máximo de  $mWI_{ij}^*$  contribuiu para a formação da matriz wrt com pouca representação de corpo d'água.

Porém, a utilização de 15% (0,15) do valor máximo de  $mWI_{ij}^*$  apresentou um aumento de pontos identificados como corpo d'água na matriz wrt produzida.

Também, foi observado que o valor k, quando constituído por 50% (0,50) da relação entre a média  $\mu_x$  e o desvio padrão  $\sigma_x$ , não foi suficiente para representar o alvo corpo d'água. Porém, quando o valor k foi de 75% (0,75) da relação entre a média  $\mu_x$  e o desvio padrão  $\sigma_x$ , ele apresentou um significativo aumento na identificação de corpo d'água.

Portanto, para ter um melhor resultado, na matriz wrt devem ser utilizados 15% do valor máximo de  $mWI_{ij}^*$  na formação da matriz B; e valor k constituído por 75% da relação entre a média  $\mu_x$  e o desvio padrão  $\sigma_x$ , como visto a seguir:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } mWI_{ij}^* > 0,15 \max(mWI_{ij}^*) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

$$k = 0,75 \left( \frac{\mu_x}{\sigma_x} \right) \quad (30)$$

onde: desvio padrão  $\sigma_x$  e média  $\mu_x$  são obtidos do vetor X produzido pela combinação de B com mWI.

Essas alterações de parâmetros em relação aos valores propostos por Polidório (2007) decorrem principalmente do fato de que as imagens adotadas em Polidório (2007) e a imagem adotada no presente trabalho não possuem referencial radiométrico comum. Além disso, também há outros fatores como o tipo de material de fundo, grau de

espalhamento atmosférico distintos, entre outros fatores que podem influenciar nos valores de ND registrados nas imagens.

A Figura 20 e a Figura 21 apresentam os resultados obtidos na identificação de corpo d'água a partir dos procedimentos sem ajuste e com ajuste, respectivamente.

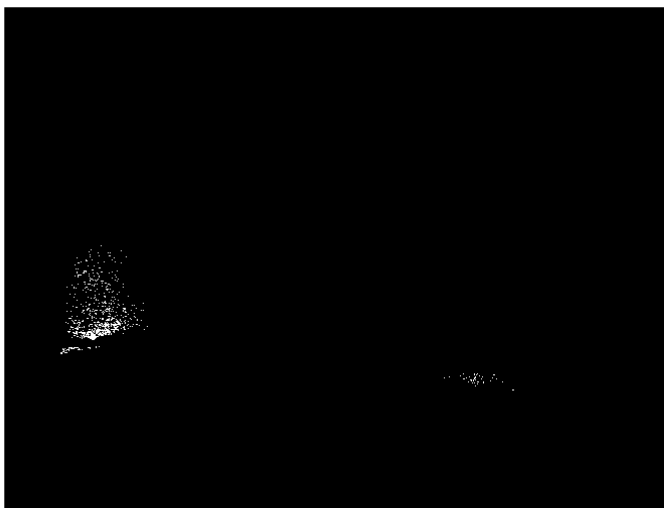


Figura 20. Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste.

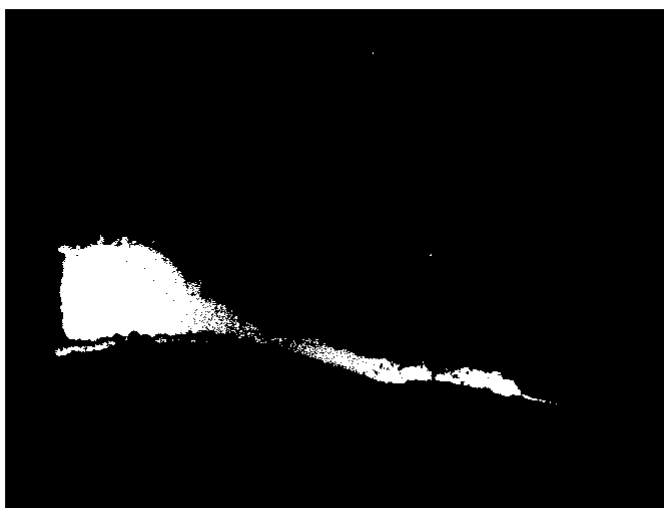


Figura 21. Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste.

A Figura 21 mostra que o resultado final da identificação de corpo d'água sofreu prejuízo. Isto ocorreu principalmente na região afunilada da lagoa. Nessa região, o alvo corpo d'água está repleto de plantas aquáticas.

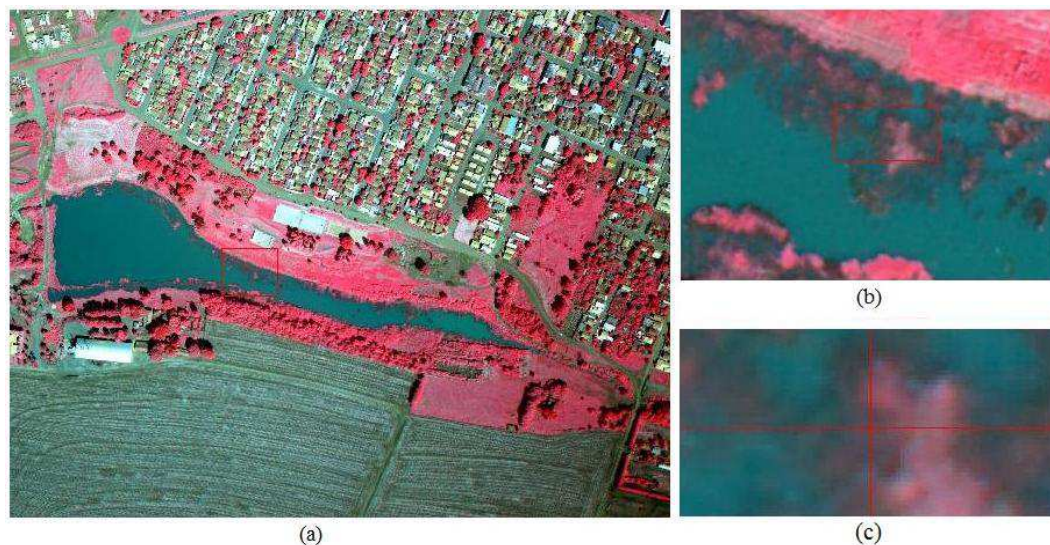


Figura 22. Macrófitas no corpo d'água. (a) Imagem infravermelha falsa cor. (b) e (c) Imagens com aumento visual.

A Figura 22 mostra a imagem infravermelha falsa cor na qual é possível ver as macrófitas na superfície da lagoa. Nas imagens ampliadas da direita é possível ver as plantas aquáticas mais detalhadamente.

### Identificação de sombra

Os procedimentos definidos por Polidorio (2007) na identificação de sombra utilizando a condição  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0$  não apresentou bons resultados. Mas os resultados melhoraram com a aplicação da condição  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > -0,55$ . O valor  $-0,55$  foi especificado com base no menor valor  $(-0,541058)$  observado nos 50 elementos amostrais de sombra de edificações.

Também, a condição  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$  definida por Polidorio (2007) não apresentou bons resultados. Para melhorar o resultado, a alternativa adotada foi utilizar 1,5, como fator de escala, no atributo NIR. Com isto, a nova condição passou a ser  $(NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij}))$ .

Portanto, para ter um resultado satisfatório na matriz sw deve ser utilizada a seguinte condição:

$$sw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij})) \text{ ou } (\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > -0,55 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

A Figura 23 e a Figura 24 mostram os resultados obtidos na identificação de sombra a partir dos procedimentos sem ajuste e com ajuste, respectivamente.

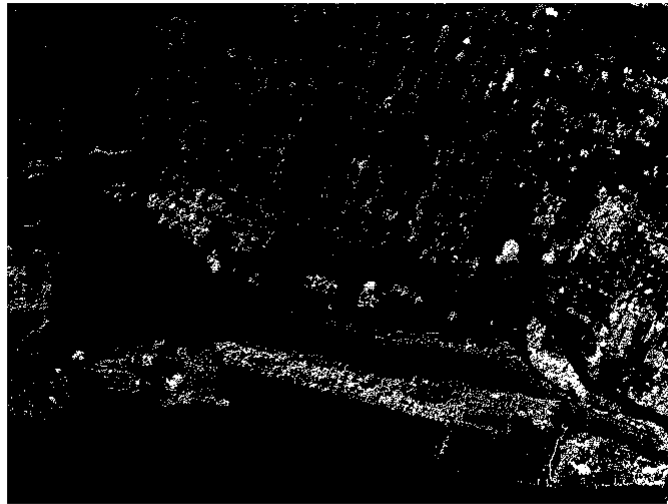


Figura 23. Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos sem ajuste.

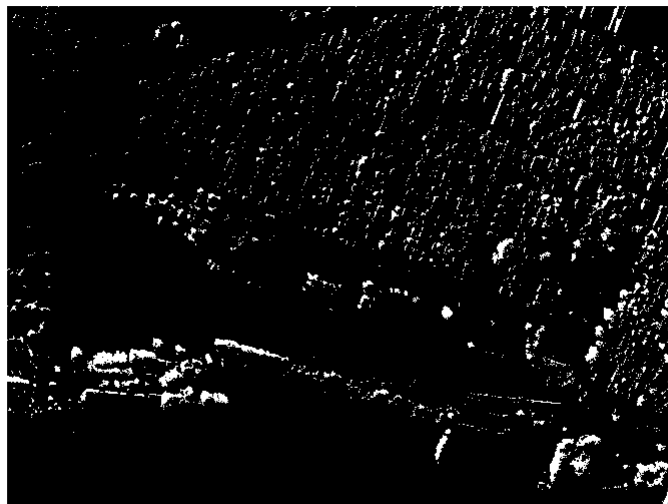


Figura 24. Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos com ajuste.

Para a identificação de sombra, a condição definida por Polidorio (2007),  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$  ou  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0$ , foi testada em 100 elementos amostrais. Esses elementos amostrais extraídos da imagem representam os seguintes alvos: vegetação, solo, via pavimentada, sombra (sombra de vegetação) e água. Também, foram utilizados 50 elementos amostrais do alvo sombra (sombra de edificação).

Os testes foram realizados na primeira parte do algoritmo da condição,  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$ , com os valores 0,50; 0,70; 1,15; e 1,50; cada um ora multiplicado por NDVI, ora multiplicado por NIR. Foram verificadas quatro situações apresentadas a seguir:

1. Se aumentar NDVI, aumenta-se vegetação;
2. Se reduzir NDVI, reduz-se vegetação;
3. Se aumentar NIR, reduz-se vegetação;
4. Se reduzir NIR, aumenta-se vegetação.

O valor de NDVI é oriundo da relação da diferença entre os componentes NIR e R pela soma desses componentes, caso seja aplicado um fator de escala ao índice NDVI ocorrerá um aumento do erro. Então, a terceira situação é a mais indicada porque utiliza um fator de escala no componente NIR.

Portanto, a solução adotada foi utilizar 1,50 como fator de escala no componente NIR (imagem infravermelha). Com isto, a primeira parte do algoritmo da condição passou a ser  $(NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij}))$ .

Foi verificado que na condição  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$  alguns elementos de vegetação possuem valores NDVI maiores que NIR. Nessa situação, o algoritmo identifica vegetação como sombra. Porém, na condição  $(NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij}))$  esses mesmos elementos de vegetação passam a ter valores de NDVI menores que NIR. Sendo assim, o algoritmo não os identifica como sombra.

Essas situações podem ser observadas nos valores que estão nas colunas  $NDVI > NIR$  e  $NDVI > 1,50NIR$  da Tabela 11 apresentada a seguir.

Tabela 11. Alvos e suas respostas nos componentes NDVI, NIR, nSI e sSI.

| ELEMENTO | Y    | X    | NDVI    | NIR    | 1,50NIR | nSI     | sSI     | NDVI>NIR      | NDVI>1,50NIR  | min(nSI,sSI)-NIR |
|----------|------|------|---------|--------|---------|---------|---------|---------------|---------------|------------------|
| SOM veg  | 1866 | 4145 | -0,1825 | 0,2403 | 0,3605  | -0,5789 | -0,4737 | FALSO         | FALSO         | -0,8193          |
| SOM veg  | 1866 | 4169 | -0,4737 | 0,1030 | 0,1545  | -0,0737 | 0,4915  | FALSO         | FALSO         | -0,1767          |
| SOM veg  | 1872 | 4187 | -0,1884 | 0,1631 | 0,2446  | 0,0364  | 0,3412  | FALSO         | FALSO         | -0,1267          |
| SOM edi  | 232  | 5300 | 0,5109  | 0,3348 | 0,5021  | -0,2750 | -0,6548 | <b>0,5109</b> | <b>0,5109</b> | -0,9895          |
| SOM edi  | 237  | 5344 | -0,5094 | 0,0773 | 0,1159  | -0,0316 | 0,5593  | FALSO         | FALSO         | -0,1088          |
| SOM edi  | 229  | 5334 | -0,4583 | 0,0773 | 0,1159  | 0,0000  | 0,5273  | FALSO         | FALSO         | -0,0773          |
| SOM edi  | 228  | 5319 | -0,4800 | 0,0901 | 0,1352  | -0,2059 | 0,3500  | FALSO         | FALSO         | -0,2960          |
| VEG esc  | 1902 | 4228 | 0,5017  | 0,5064 | 0,7597  | -0,4775 | -0,7671 | FALSO         | FALSO         | -1,2735          |
| VEG esc  | 1961 | 4150 | 0,5421  | 0,5236 | 0,7854  | -0,3739 | -0,7283 | <b>0,5421</b> | FALSO         | -1,2519          |
| VEG esc  | 1976 | 4148 | 0,5016  | 0,5322 | 0,7983  | -0,5000 | -0,7778 | FALSO         | FALSO         | -1,3100          |
| VEG cla  | 2562 | 1986 | 0,4286  | 0,5536 | 0,8305  | -0,2157 | -0,6000 | FALSO         | FALSO         | -1,1536          |
| VEG cla  | 2542 | 2014 | 0,3472  | 0,4549 | 0,6824  | -0,2838 | -0,5709 | FALSO         | FALSO         | -1,0258          |
| VEG cla  | 2542 | 1976 | 0,3471  | 0,4592 | 0,6888  | -0,2838 | -0,5743 | FALSO         | FALSO         | -1,0335          |

A Tabela 11 apresenta os elementos e suas respostas nos componentes NDVI, NIR, nSI, sSI e nas condições. A coluna ELEMENTO tem a seguinte legenda: SOM veg (sombra de vegetação), SOM edi (sombra de edificação), VEG esc (vegetação escura) e VEG cla (vegetação clara). As colunas X e Y possuem os valores das coordenadas dos elementos na unidade pixel. A coluna NIR possui os valores da imagem infravermelha redistribuídos no intervalo 0 a 1.

Na Tabela 11, as células FALSO não satisfazem as condições definidas na coluna. Então, os valores dos elementos dessas células devem ser analisados pelo algoritmo da condição,  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij})$ , para identificá-los como sombra ou não sombra. As células que não receberam FALSO, ou seja, os valores 0,5109 e 0,5421, foram identificadas como sombra na condição  $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$ . A célula que contém o valor 0,5109, realmente, é sombra. Mas, a célula 0,5421, que é vegetação, foi identificada como sombra. Para corrigir essa identificação equivocada, o seu elemento correspondente na coluna NIR foi multiplicado por 1,50 (fator de escala). Então, com o novo algoritmo da condição  $(NDVI_{ij} > 1,50NIR_{ij})$  essa célula recebeu FALSO, ou seja, não foi identificada como sombra. Observe que a célula que contém o valor 0,5109, mesmo aplicada ao novo algoritmo da condição, ainda assim foi identificada como sombra.

A segunda parte do algoritmo da condição,  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0$ , inicialmente, não apresentou bons resultados. O resultado melhorou após alterar para a expressão  $> -0,55$ . Esse valor foi idealizado a partir do menor valor de sombra ( $-0,541058$ ) verificado nos 50 elementos amostrais de sombras de edificações quando submetidas ao algoritmo  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij})$ , como pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 12. Valores de  $(\min(nSI, sSI) - NIR)$  dos elementos amostrais.

| ALVO    | MENOR VALOR      | MAIOR VALOR |
|---------|------------------|-------------|
| VEG     | -1,792725        | -1,371486   |
| SOL     | -0,765175        | -0,579426   |
| ROD     | -1,101420        | -0,976994   |
| SOM veg | -0,092184        | 0,049587    |
| SOM edi | <b>-0,541508</b> | 0,074074    |
| AGU     | -0,756936        | -0,669281   |

A Tabela 12 apresenta os valores dos resultados da aplicação do algoritmo  $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij})$ . A coluna ALVO tem a seguinte legenda: VEG (vegetação), SOL (Solo), ROD (via pavimentada), SOM veg (sombra de vegetação), SOM edi (sombra de edificação) e AGU (corpo d'água). Foram utilizados 100 elementos amostrais de cada elemento, exceto no elemento SOM edi (sombra de edificação) que foram utilizadas 50 pontos amostrais devido à menor frequência desse tipo de alvo na imagem adotada.

A Figura 25 mostra quatro imagens ampliadas numa região onde há o alvo sombra. A Figura 25(a) representa a imagem no espectro do visível; a Figura 25(b), a imagem infravermelha; a Figura 25(c) representa a imagem binária shd (sombra) resultado da aplicação do algoritmo sem ajuste; e a Figura 25(d) representa a imagem binária shd (sombra) resultado da aplicação do algoritmo com ajuste.

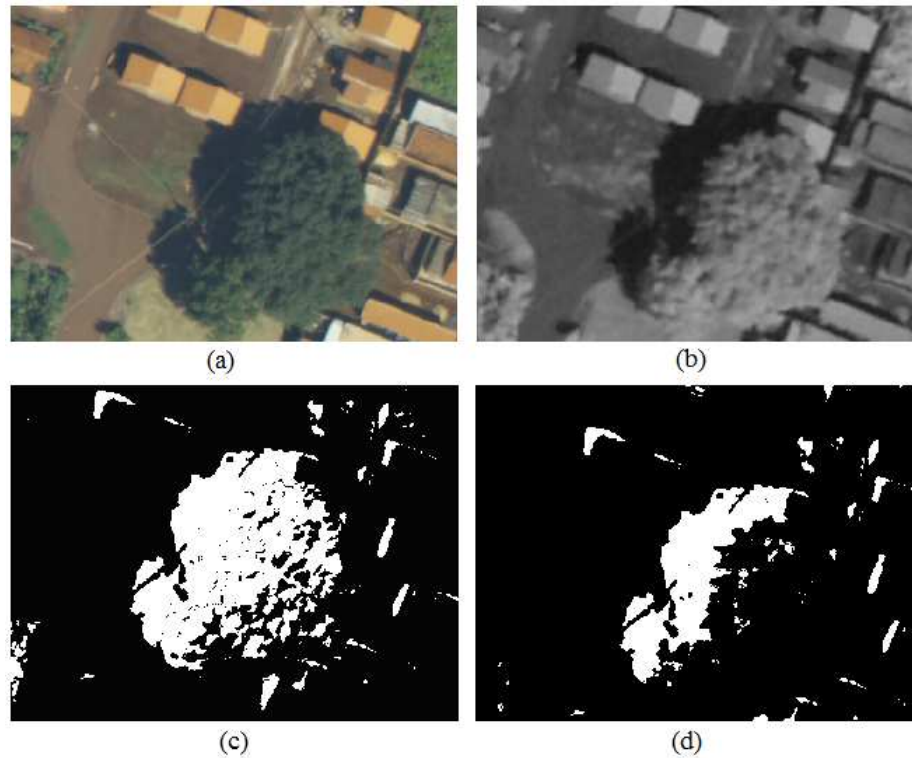


Figura 25. Visualização ampliada sobre a sombra de vegetação. (a) Imagem no espectro do visível. (b) Imagem infravermelha. (c) Imagem binária shd sem ajuste. (d) Imagem binária shd com ajuste.

### Identificação de via pavimentada

Os experimentos mostraram que, ao aplicar a equação  $nRI_{ij} + mWI_{ij} + WWI_{ij}$ , para gerar a matriz  $rd$ , os pixels de vias pavimentadas passaram a ter os valores de brilho na variação de  $-1,30$  a  $-0,90$ . Esses valores foram diferentes dos valores de Polidorio (2007), que definiu que vias pavimentadas apresentam valores maiores que zero no resultado da equação  $nRI_{ij} + mWI_{ij} + WWI_{ij}$ . Essas diferenças estão, principalmente, relacionadas com diferenças devido ao registro de valores de ND que não estão relacionados com um único referencial radiométrico, diferenças da resposta espectral de alvos do mesmo tipo com o agravante de não terem sido minimizados os efeitos atmosféricos.

Sendo assim, foi adotado outro valor de limiar para gerar a matriz  $B$ , dado por  $rd_{ij} > -1,30$ . Pois, o valor  $-1,30$  foi o menor valor observado para via pavimentada na matriz  $rd$ .

Portanto, considerando a baixa qualidade do resultado, decidiu-se modificar a matriz B de acordo com a seguinte condição:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} > -1,30 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

Para determinar a matriz  $rod^1$ , foi verificado que a condição  $rd_{ij} < (m\mu_x - \sigma_x)$ , definida por Polidório (2007), apresentou resultado avaliado visualmente como sendo satisfatório quando a expressão  $(m\mu_x - \sigma_x)$  apresentou valor em torno de  $-0,70$ . Nos experimentos, o valor em torno de  $-0,70$  foi alcançado quando a média  $\mu_x$  foi multiplicada por  $1,50$ . Portanto, para determinar a matriz  $rod^1$  o limiar passou a ser:

$$rod_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} < (1,50\mu_x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ ; e média  $\mu_x$  obtida do vetor X produzido pela combinação de B com rd.

Para determinar a matriz  $rod^2$ , foi verificado que a condição  $rd_{ij} > (n\mu_x + \sigma_x)$ , definida por Polidório (2007), apresentou resultado adequado quando a expressão  $(n\mu_x + \sigma_x)$  apresentou valor em torno de  $-1,30$ . Nos experimentos, o valor em torno de  $-1,30$  foi alcançado pelos valores de média  $\mu_x$  multiplicados por  $2,50$ . Então, para determinar a matriz  $rod^2$  o limiar passou a ser:

$$rod_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & \text{se } rd_{ij} > (2,50\mu_x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ ; e média  $\mu_x$  obtida do vetor X produzido pela combinação de B com rd.

A Figura 26 e a Figura 27 mostram os resultados obtidos na identificação de via pavimentada a partir dos procedimentos sem ajuste e com ajuste, respectivamente.

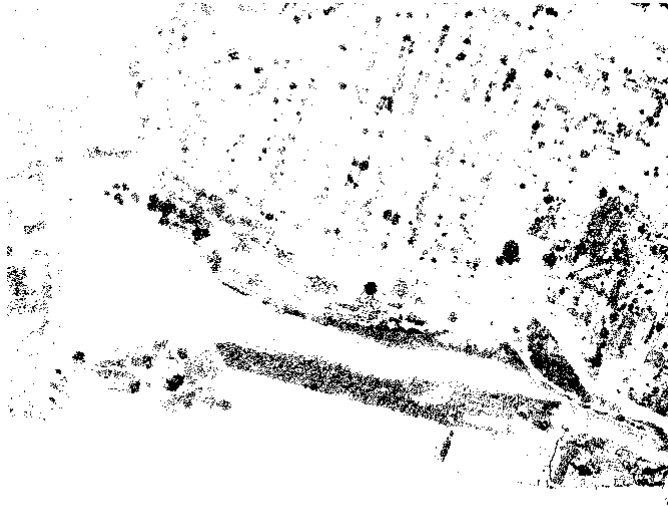


Figura 26. Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos sem ajuste.



Figura 27. Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos com ajuste.

## Identificação de vegetação

A proposta desenvolvida por Polidório (2007) para identificar o alvo vegetação baseia-se na condição  $(NDVI_{ij} + WWI_{ij} + \frac{1}{2}NIR_{ij}) > 0$ .

Os experimentos para gerar a matriz V com o valor  $\frac{1}{2}NIR_{ij}$ , ou seja, metade dos valores da imagem infravermelha, apresentaram muitas identificações dos alvos corpo d'água e sombra. Em outras palavras, os experimentos mostraram que o valor  $\frac{1}{2}NIR_{ij}$  não foi adequado para identificar uma grande quantidade de cobertura vegetal. Sendo assim, o procedimento para identificar vegetação não apresentou bons resultados como pode ser visto na matriz vgt, na Figura 28.

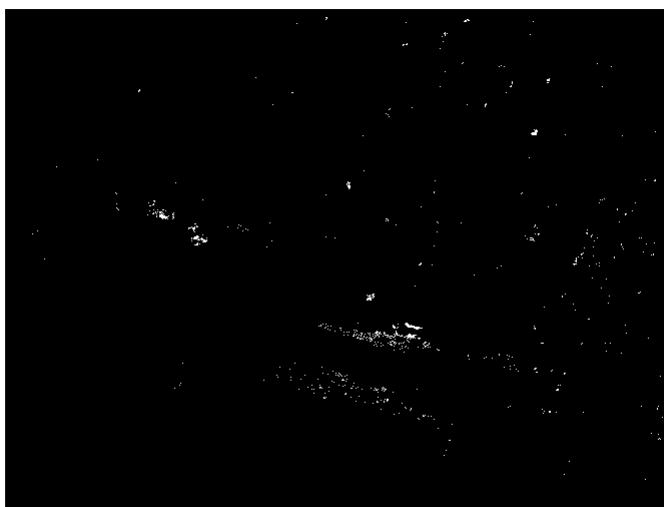


Figura 28. Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste.

Os experimentos mostraram que para identificar vegetação o atributo NIR, imagem na faixa do infravermelho, não deve ser alterado. Sendo assim, o ajuste necessário para determinar a matriz V utilizou a imagem infravermelha sem alteração.

A nova equação passou a ser  $NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}$  que gerou valores negativos para os alvos das classes sombra e corpo d'água, e valores positivos para o alvo da classe vegetação. Os valores de sombra e vegetação são mostrados na Figura 29.

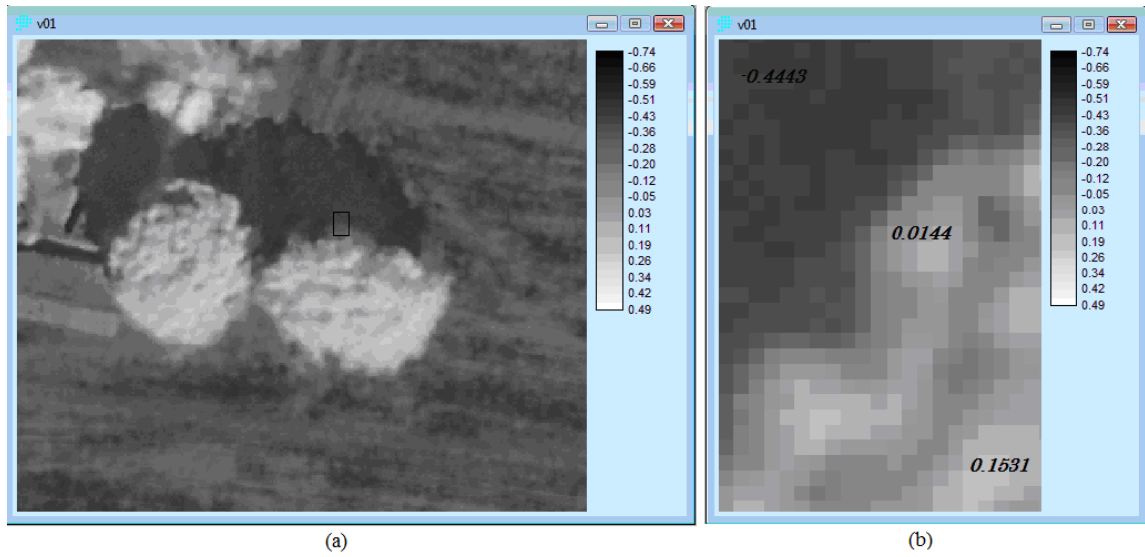


Figura 29. Imagem obtida pela equação  $NDVI + WWI + NIR$ . (a) Imagem ampliada numa região com sombra e vegetação. (b) Imagem ampliada na região de divisa entre sombra e vegetação.

A Figura 29 apresenta a imagem obtida pela equação  $NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}$  em duas situações: a primeira situação apresenta uma visualização geral da imagem, na qual é possível destacar os alvos das classes sombra (cor preta) e vegetação (cor branca); e a segunda situação apresenta uma visualização ampliada da imagem na região de divisa entre sombra e vegetação.

A matriz obtida pela equação  $NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}$  apresentou valores positivos para o alvo vegetação e valores negativos para boa parte dos alvos das classes sombra e corpo d'água. Portanto, o alvo vegetação foi sempre identificado com valor maior que zero. Com base nessa análise, a nova condição para gerar a matriz  $V$  foi dada por:

$$V_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^{*+}$ .

A Figura 30 mostra o resultado obtido na identificação de vegetação a partir dos procedimentos com ajuste.



Figura 30. Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste.

### 5.2.1 Análise estatística da qualidade do resultado da área de estudo Tarumã

A análise da qualidade dos resultados obtidos pelos procedimentos com ajustes foi realizada através da exatidão global e do coeficiente *kappa*. Para isso, a área de dimensão 400 por 400 pixels foi escolhida na região da imagem que contém os elementos específicos: corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação. Porém, não foi possível encontrar uma única região que englobasse os 4 alvos específicos. Portanto, foram definidas duas regiões que englobam esses alvos, como visto na Figura 31.

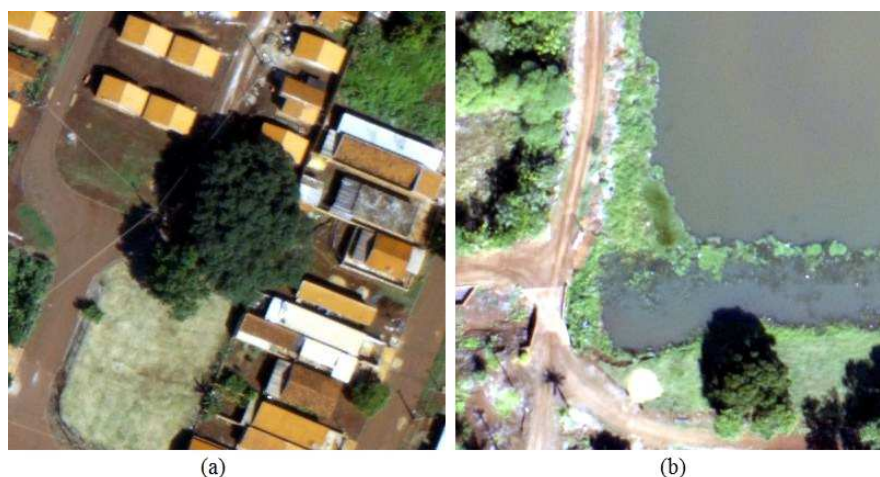


Figura 31. Regiões escolhidas para verificar a qualidade dos resultados.

As tabelas a seguir mostram as matrizes de confusão geradas pela identificação dos alvos das classes sombra (shd), via pavimentada (rod), vegetação (vgt) e corpo d'água (wrt).

Tabela 13. Matriz de confusão (sombra).

|                    |       | Plano de Referência |       |       |
|--------------------|-------|---------------------|-------|-------|
|                    |       | shd                 | Fundo | Total |
| Plano Classificado | shd   | 10                  | 0     | 10    |
|                    | Fundo | 2                   | 88    | 90    |
|                    | Total | 12                  | 88    | 100   |

Tabela 14. Matriz de confusão (via pavimentada).

|                    |       | Plano de Referência |       |       |
|--------------------|-------|---------------------|-------|-------|
|                    |       | rod                 | Fundo | Total |
| Plano Classificado | rod   | 14                  | 10    | 24    |
|                    | Fundo | 2                   | 74    | 76    |
|                    | Total | 16                  | 84    | 100   |

Tabela 15. Matriz de confusão (vegetação).

|                    |       | Plano de Referência |       |       |
|--------------------|-------|---------------------|-------|-------|
|                    |       | vgt                 | Fundo | Total |
| Plano Classificado | vgt   | 18                  | 0     | 18    |
|                    | Fundo | 8                   | 74    | 82    |
|                    | Total | 26                  | 74    | 100   |

Tabela 16. Matriz de confusão (corpo d'água).

|                    |       | Plano de Referência |       |       |
|--------------------|-------|---------------------|-------|-------|
|                    |       | wtr                 | Fundo | Total |
| Plano Classificado | wtr   | 31                  | 0     | 31    |
|                    | Fundo | 7                   | 62    | 69    |
|                    | Total | 38                  | 62    | 100   |

Para facilitar a análise, os valores da exatidão global e do coeficiente *kappa* foram reunidos na tabela a seguir.

Tabela 17. Valores da exatidão global e do coeficiente *kappa* dos alvos.

| ALVOS           | EXATIDÃO GLOBAL | COEFICIENTE KAPPA |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Sombra          | 0,98            | 0,90              |
| Via Pavimentada | 0,88            | 0,63              |
| Vegetação       | 0,92            | 0,77              |
| Corpo d'água    | 0,93            | 0,85              |

Os valores apresentados na Tabela 17 mostram que os alvos das classes sombra, via pavimentada, vegetação e corpo d'água foram rotulados com os maiores valores de exatidão global e de coeficiente *kappa*.

De acordo com a avaliação do valor *kappa* proposta por Landis e Koch (1977), a qualidade dos resultados obtidos, nas regiões escolhidas, foi avaliada como MUITO BOA, para via pavimentada e vegetação; e EXCELENTE, para sombra e corpo d'água.

### 5.3 Análise e ajuste do resultado da identificação da área de estudo Presidente Prudente

Os procedimentos para identificar corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação nas imagens das faixas do espectro do visível e do infravermelho foram desenvolvidos com base na área de estudo Tarumã. Sendo assim, os modelos matemáticos utilizados nas combinações entre os índices têm como referência as imagens da área de estudo Tarumã.

No entanto, como teste, esses procedimentos foram aplicados às imagens da área de estudo Presidente Prudente. Nesse caso, foram apresentados três tipos de resultados:

- (a) resultado obtido a partir da aplicação dos procedimentos desenvolvidos por Polidorio (2007);
- (b) resultado obtido após a aplicação dos ajustes para melhorar os resultados do item (a);
- (c) resultado obtido após a aplicação dos ajustes no algoritmo de identificação de corpo d'água para melhorar o resultado do item (b).

Para facilitar o entendimento, o resultado do tipo (a) foi chamado de imagem obtida a partir dos procedimentos sem ajustes; o do tipo (b), de imagem obtida a partir dos procedimentos com ajustes; e o do tipo (c), de imagem obtida a partir dos procedimentos com ajustes no algoritmo de identificação de corpo d'água.

Os ajustes realizados no algoritmo de identificação dos alvos da classe corpo d'água foram necessários, porque essa classe é utilizada nos outros procedimentos para

identificar os alvos das classes sombra, via pavimentada e vegetação. Portanto, um bom resultado na identificação dos alvos da classe corpo d'água pode significar uma melhoria na identificação dos outros alvos.

Sendo assim, na primeira etapa do procedimento para identificar os alvos das classes sombra, via pavimentada e vegetação foi utilizada a matriz wrt (corpo d'água) obtida a partir dos procedimentos sem os ajustes; na segunda etapa, a matriz wrt (corpo d'água) obtida com ajuste; e finalmente, na terceira etapa, a matriz wrt (corpo d'água) obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

É importante esclarecer que na área de estudo Presidente Prudente, não houve alterações nos algoritmos dos procedimentos de identificação dos alvos das classes sombra, via pavimentada e vegetação.

Para facilitar a visualização dos resultados obtidos, foi realizado aumento visual (*mais zoom*) na região situada na parte inferior, lado esquerdo da imagem. Essa região, que engloba duas piscinas, foi escolhida, pois possui os alvos das classes corpo d'água, via pavimentada, sombra e vegetação.

### Identificação de corpo d'água

O procedimento definido por Polidório (2007), ou seja, o procedimento sem ajuste, apresentou a imagem binária wrt com bastante confusão ao identificar os alvos da classe corpo d'água, mostrado na Figura 32(b).

No procedimento com ajuste, também houve bastante confusão ao identificar corpo d'água na imagem binária wrt, verificado na Figura 32(c).

Porém, ao alterar no procedimento com ajuste, o valor  $k$  constituído por 0% da relação entre a média  $\mu_x$  e o desvio padrão  $\sigma_x$  houve uma melhoria visual no resultado da identificação de corpo d'água, apresentado na Figura 32(d).

Isso significa que na expressão  $(mWI_{ij} - k(NIR_{ij}))$  utilizada para gerar a matriz  $W$ , a imagem infravermelha é desconsiderada quando ponderada pelo valor  $k = 0$ . Portanto, a nova condição para formar a matriz  $W$  passa a ser:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } mWI_{ij} > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde:  $1 \leq i \leq m$  e  $1 \leq j \leq n$  para  $i, j, m, n \in \mathbb{Z}^+$ .

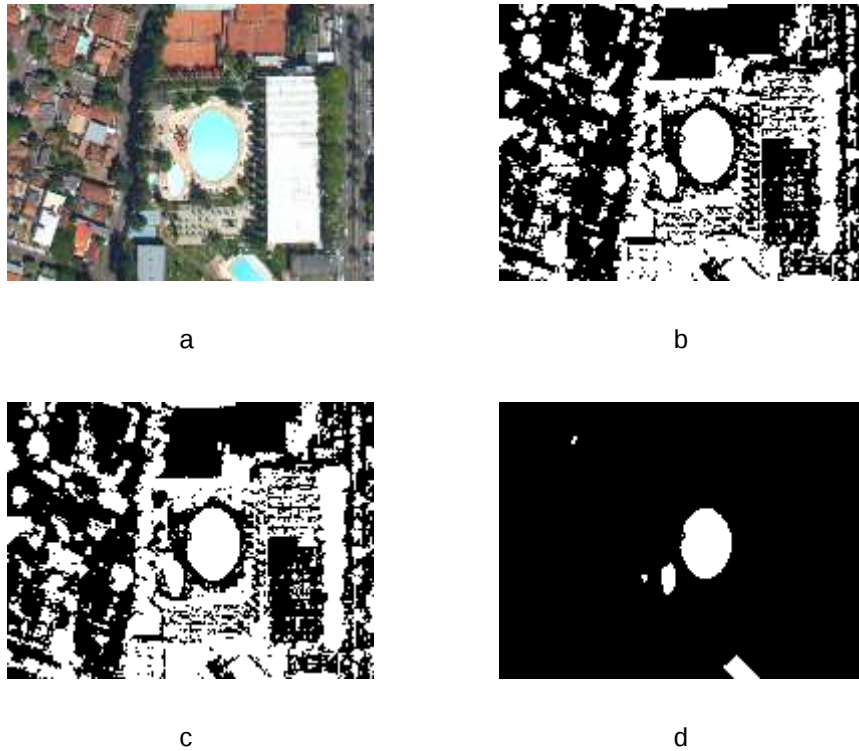


Figura 32. Identificação de corpo d'água. (a) Imagem da faixa do espectro do visível. (b) Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. (c) Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste. (d) Imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

### Identificação de sombra

As imagens binárias shd obtidas nos procedimentos de identificação de sombra estão mostradas na Figura 33.

A Figura 33(d) apresentou o melhor resultado visual na identificação de sombra. Pois nesse caso, o procedimento utilizou a imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

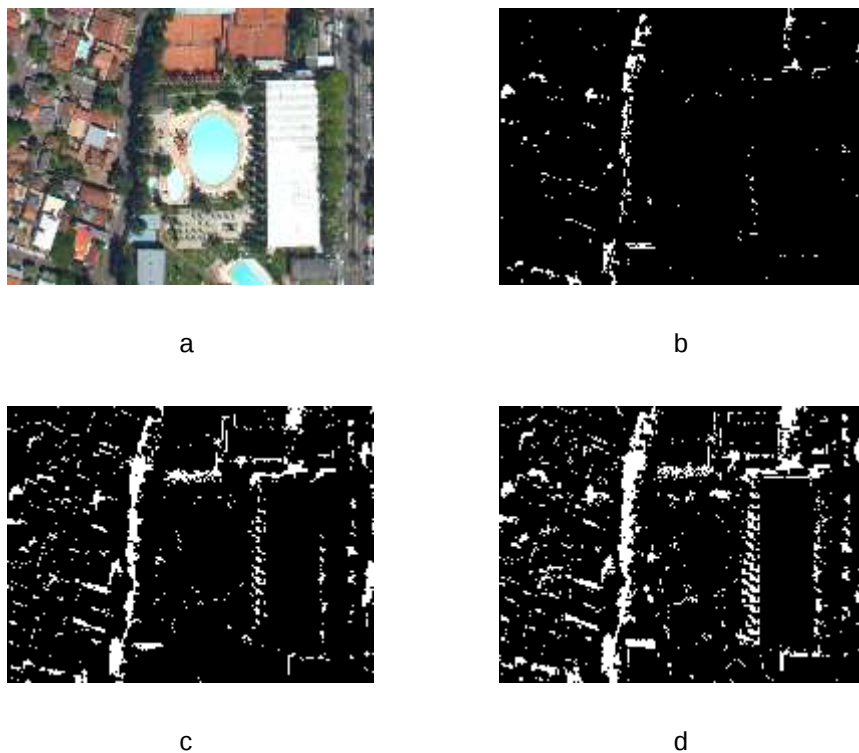


Figura 33. Identificação de sombra. (a) Imagem da faixa do espectro do visível. (b) Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. (c) Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos com ajuste. (d) Imagem binária shd obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

### Identificação de via pavimentada

As imagens binárias rod obtidas nos procedimentos de identificação de via pavimentada estão mostradas na Figura 34.

Mesmo com a imagem binária wrt obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água o resultado final não melhorou, como visto na Figura 34(d).

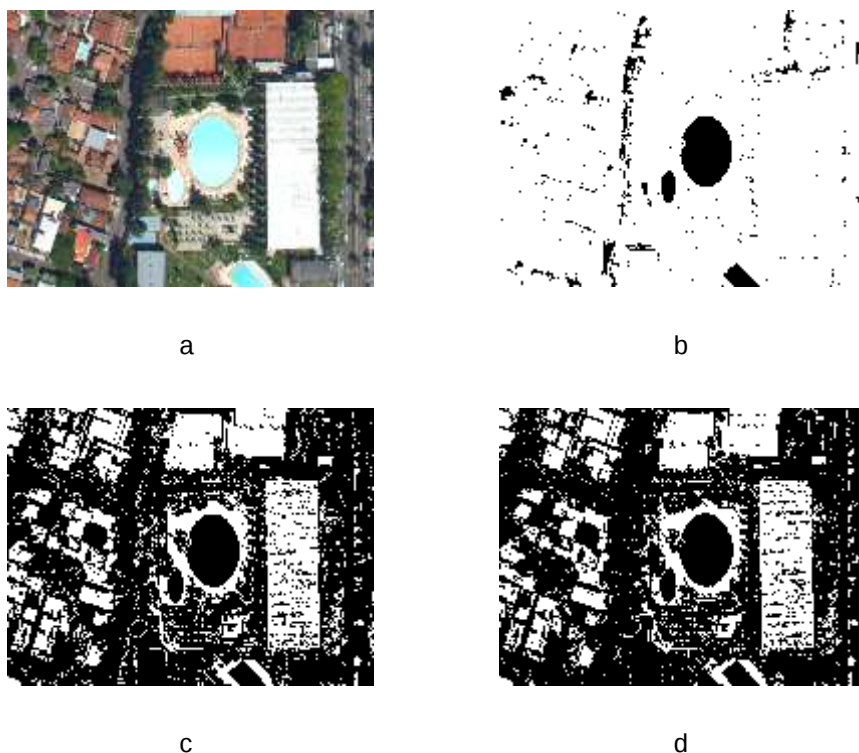


Figura 34. Identificação de via pavimentada. (a) Imagem da faixa do espectro do visível. (b) Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. (c) Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos com ajuste. (d) Imagem binária rod obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

### Identificação de vegetação

As imagens binárias vgt obtidas nos procedimentos de identificação de vegetação estão mostradas na Figura 35.

Entre todos os resultados, a imagem binária vgt obtida a partir do procedimento sem ajuste apresentou o pior resultado, observado na Figura 35(b). Entretanto, houve um aumento de pontos identificados como vegetação na imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste, visto na Figura 35(c).

O melhor resultado ocorreu na imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água. Porém, o algoritmo apresentou erros ao identificar telhados de amianto como vegetação, verificado na Figura 35(d).

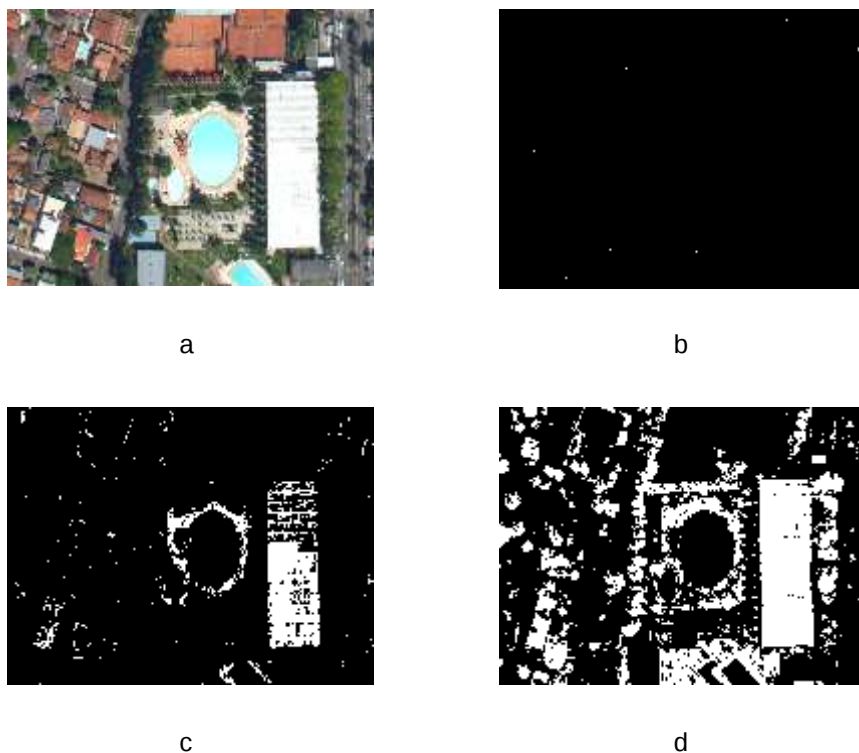


Figura 35. Identificação de vegetação. (a) Imagem da faixa do espectro do visível. (b) Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos sem ajuste. (c) Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste. (d) Imagem binária vgt obtida a partir dos procedimentos com ajuste no algoritmo de identificação de corpo d'água.

### 5.3.1 Análise visual da qualidade do resultado da área de estudo Presidente Prudente

As imagens da faixa do espectro do visível utilizadas na área de estudo Presidente Prudente foram produzidas pela fusão entre as imagens obtidas pelas câmaras FUJI. Nesse caso, os procedimentos que utilizam somente as imagens da faixa do espectro do visível, tratados no trabalho de Polidório (2007) e não nesse trabalho, foram utilizados para verificar a qualidade da correção de brilho realizado nas imagens fusionadas.

Os procedimentos que utilizam somente as imagens da faixa do espectro do visível servem para identificar os alvos das classes sombra e vegetação.

O resultado obtido na identificação dos alvos da classe sombra apresentou uma imagem com um aspecto dividido ao meio, ou seja, somente uma parte da imagem respondeu adequadamente ao algoritmo utilizado no procedimento, como verificado na Figura 36.

Com menos intensidade, o mesmo ocorreu no resultado obtido na identificação de vegetação, como observado na Figura 37.

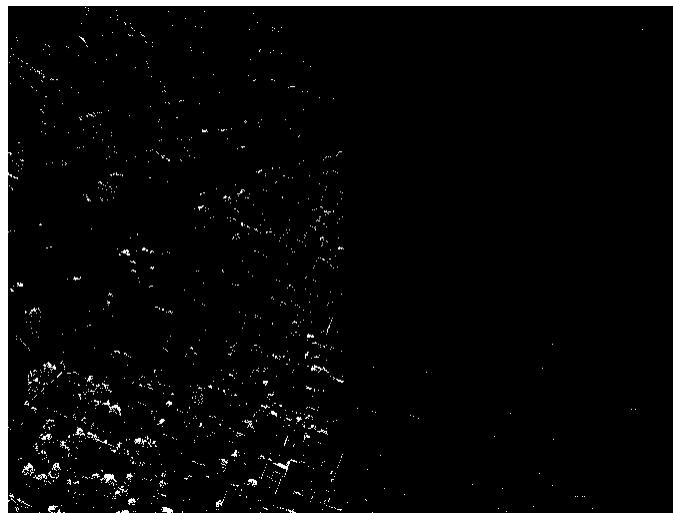


Figura 36. Análise visual na identificação de sombra.

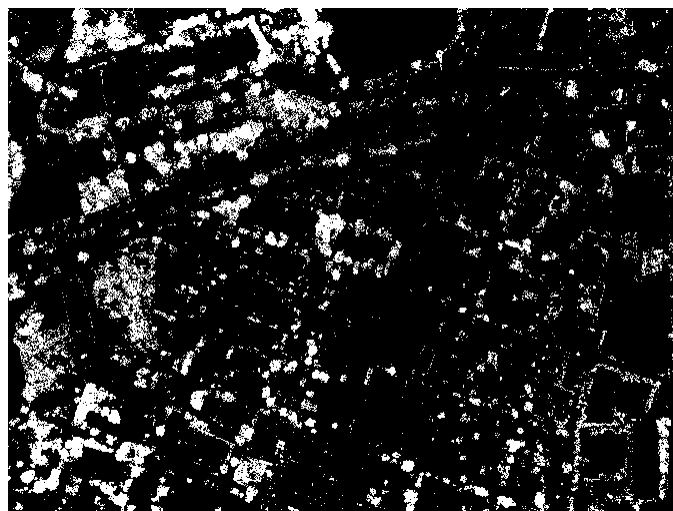


Figura 37. Análise visual na identificação de vegetação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Considerações

No que diz respeito ao pré-processamento da imagem, a abordagem para corrigir o efeito vinhete pela análise de superfície de tendência apresentou resultados satisfatórios.

A abordagem da primeira estratégia para corrigir o efeito vinhete produziu resultado capaz de minimizá-lo. O decréscimo nos valores de brilho das sombras, observado no gráfico da Figura 15, foi minimizado com essa abordagem, como verificado no gráfico da Figura 17. As inclinações negativas muito acentuadas das linhas de tendência observadas no gráfico da Figura 15 foram suavizadas após aplicação da primeira estratégia.

Porém, após as intervenções realizadas na primeira estratégia, os novos componentes R, G e B apresentaram distanciamento entre si não coerente com o distanciamento dos componentes R, G e B da imagem original (sem alteração), como observado na Figura 17 e na Figura 15, respectivamente.

Isso se explica devido à alta correlação entre os componentes R, G e B. Ao passo que qualquer intervenção realizada diretamente nesses componentes apresentará resultado encadeado.

A abordagem da segunda estratégia para corrigir o efeito vinhete também produziu resultado capaz de minimizá-lo. O decréscimo nos valores de brilho das sombras, observado no gráfico da Figura 15, foi minimizado com essa abordagem, como verificado no gráfico da Figura 19. As linhas de tendência com inclinações negativas muito acentuadas observadas no gráfico da Figura 15 foram suavizadas após a aplicação da segunda estratégia.

Após as intervenções realizadas no componente I, os componentes R, G e B convertidos apresentaram distanciamento entre si muito coerente com o distanciamento dos componentes R, G e B da imagem original (sem alteração), como verificado na Figura 19 e na Figura 15, respectivamente.

Isso se explica, pois as intervenções foram realizadas no componente I que é descorrelacionado dos componentes R, G e B. Dessa forma, qualquer intervenção realizada diretamente no componente I não apresentará resultado encadeado nos componentes R, G e B.

No que diz respeito aos procedimentos de identificação de alvos urbanos, os resultados obtidos confirmam a hipótese de que as abordagens propostas por Polidório (2007) podem ser aplicadas em mapeamento de áreas urbanas para reconhecer e identificar alvos específicos nas imagens adquiridas pelo SAAPI, ou sistemas similares, que operam nas faixas do espectro do visível e do infravermelho próximo, desde que modificadas.

As análises iniciais aplicadas aos resultados obtidos a partir dos procedimentos definidos por Polidório (2007) conduziram à necessidade de ajustes para melhorar os resultados finais. Sendo assim, alguns ajustes foram realizados, principalmente, no que diz respeito aos modelos matemáticos utilizados nos procedimentos de identificação dos alvos específicos.

É importante ressaltar que os ajustes não interferem na essência da abordagem de Polidório (2007). Mas, as modificações necessárias à adoção dessa abordagem mostram que os ajustes radiométricos e os ajustes de valores de limiares que fazem parte da proposta original não são suficientes para solucionar os problemas causados pelas diferenças radiométricas e de tecnologia de imageamento.

A utilização da imagem na faixa do infravermelho no processo de identificação dos alvos específicos permitiu diferenciar sombra e vegetação e minimizar a confusão entre sombra e corpo d'água.

No que diz respeito às imagens utilizadas na área de estudo Tarumã, houve melhoramento no resultado que gerou a imagem binária wrt obtida na identificação de corpo d'água a partir dos procedimentos com ajuste.

Mesmo assim, o resultado final da identificação do alvo corpo d'água sofreu prejuízo. Isto ocorreu principalmente na região afunilada da lagoa. Nessa região, o alvo corpo d'água está repleto de macrófitas. Como o algoritmo exclui vegetação e na região afunilada há uma grande quantidade de macrófitas na superfície da lagoa, então essa região sofreu prejuízo na identificação do alvo corpo d'água.

O algoritmo utilizado por Polidório (2007) no procedimento para identificar sombras não apresentou bom resultado para as imagens estudadas. Após alguns testes aplicados ao algoritmo, foram observadas duas relações importantes: (a) relação direta entre o

índice NDVI e o alvo vegetação e (b) relação inversa entre o componente NIR e o alvo vegetação.

Nesse caso, um ajuste no algoritmo com base no índice NDVI poderia significar um aumento do erro, visto que o índice é oriundo da relação da diferença entre os componentes NIR e R. Portanto, foi realizado o ajuste no algoritmo com base no aumento do valor do componente NIR e assim, reduzir a identificação equivocada da vegetação.

Na identificação do alvo via pavimentada, os experimentos mostraram que esse alvo, quando aplicado à equação  $NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}$ , apresenta valores de brilho que variam de  $-1,30$  a  $-0,90$ . Como  $-1,30$  foi o valor de brilho mais baixo verificado, então ele foi utilizado na condição  $rd_{ij} > -1,30$  para formar a matriz B.

As propostas para eliminar parte dos alvos, que não são vias pavimentadas, apresentaram bons resultados quando foram definidas as condições  $rd_{ij} < (1,50\mu_x)$  e  $rd_{ij} > (2,50\mu_x)$ . Essas condições foram utilizadas nos procedimentos da primeira eliminação e da segunda eliminação, respectivamente.

Para identificar os alvos do tipo vegetação, os valores do componente NIR não sofreram alterações. Assim, a equação  $NDVI_{ij} + WWI_{ij} + NIR_{ij}$  apresentou valores positivos para o alvo vegetação e valores negativos para boa parte dos alvos sombra e corpo d'água.

A análise da qualidade dos resultados obtidos pelos procedimentos com ajustes foi realizada através da exatidão global e do coeficiente *kappa*. Para isso, a análise foi realizada em duas regiões que englobam os alvos das classes corpo d'água, sombra, via pavimentada e vegetação.

De acordo com a avaliação do valor *kappa* proposto Landis e Koch (1977), a qualidade dos resultados obtidos, nas regiões escolhidas, foi classificada como MUITO BOA, para via pavimentada; e EXCELENTE, para sombra, vegetação e corpo d'água.

É importante ressaltar que os ajustes realizados nos procedimentos tiveram como referência as imagens da área de estudo Tarumã adquiridas pelas câmaras HASSELBLAD H3D e SONY F-828.

No entanto, como teste, esses procedimentos foram aplicados às imagens da área de estudo Presidente Prudente adquiridas pelas câmaras FUJI FINEPIX S3 PRO e SONY F-828.

De início, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Para melhorá-los, alguns ajustes foram realizados no algoritmo de identificação de corpo d'água.

O fato de esse alvo ser utilizado em todos os outros procedimentos de identificação levou a crer que um bom resultado associado ao alvo corpo d'água poderia contribuir para um melhoramento nos resultados da identificação de outros alvos específicos (sombra, via pavimentada e vegetação).

Sendo assim, o ajuste de parâmetros conduziu a um melhoramento nos resultados obtidos com modificações realizadas no algoritmo de identificação de corpo d'água.

Porém, para que os resultados finais sejam mais adequados, são necessários novos ajustes nos algoritmos dos procedimentos de identificação com base nas imagens da área de estudo Presidente Prudente.

Outro fator importante que pode influenciar no melhoramento do resultado final é a qualidade da correção de brilho realizada na imagem que sofreu fusão. Como os alvos estão representados com distribuição de valores de ND distintos, a aplicação dos processamentos baseados somente na resposta espectral não produzem resultado equivalente em cada uma das partes da imagem fusionada. A análise visual realizada nos resultados obtidos pelos procedimentos que utilizam as imagens da faixa do espectro do visível mostrou que houve problemas na correção de brilho das imagens que compõem a cena fusionada da área de estudo Presidente Prudente. Essa correção foi realizada com o propósito de produzir uma cena visualmente contínua, mas os resultados da análise baseada nos procedimentos propostos por Polidório (2007) demonstraram que a imagem obtida pela fusão de duas cenas não é invariante espacialmente e, portanto, não pode ser tratada com os mesmos parâmetros para as partes que a compõe.

## **6.2 Recomendações**

Por fim, com base nos resultados obtidos algumas recomendações podem ser feitas:

- Aplicar a abordagem para corrigir o efeito vinhete pela análise de superfície de tendência em um conjunto de dados de sombras, coletado automaticamente.
- Utilizar imagens cujos valores radiométricos sejam calibrados de forma que os ajustes automáticos de limiares e as correções radiométricas que fazem parte do algoritmo sejam suficientes para aplicar o procedimento com sucesso;
- Testar os procedimentos de identificação de alvos específicos propostos nesse trabalho em imagens adquiridas por outras configurações do sistema de aquisição de colega do SA-API em regiões com diferentes condições atmosféricas;
- Realizar procedimento mais apurado na correção de brilho das imagens oriundas do processo de fusão considerando, inclusive, as variações das medidas radiométricas causadas pelas variações devido ao efeito especular na reflexão da energia radiométrica;
- Automatizar o processo;
- Combinar detector de bordas para discriminar sombras;
- Realizar análise semântica dos objetos;
- Aplicar outros algoritmos de detecção de sombras;
- Aplicar testes estatísticos mais complexos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of photogrammetry**. 4. ed. Falls Church, VA: Chester C., 1980. 1056 p.

BANON, G. J. F.; BARRERA, J. **Bases da morfologia matemática para análise de imagens binárias**. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 1998. 227 p.

BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, n. 2, p. 130-138, 1965.

BOWKER, D. E.; DAVIS, R. E.; Myrick, D. L.; STACY, K.; JONES, W. T. et al. **Spectral references of natural targets for use in remote sensing studies**. Hampton: NASA Reference Publication 1139, 1985. 188 p.

CHUVIECO, E. **Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio**. 1. ed. Barcelona: Ariel Ciência, 2002. 586 p.

COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, n. 20, p. 37-46, 1960.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, p. 35-46, 1991.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1992. 716 p.

HAY, A. M. Sampling designs to test land-use map accuracy. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 45, p. 529-533, 1979.

JENSEN, R. J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: José Carlos Neves Epiphanyo (Coord) et al. São José dos Campos: Parênteses, 2009. 598 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: EDUNESP, 1998. 226 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n.1, p. 159-174, 1977.

LANGHI, P.; TOMMASELLI, A. M. G. Correção radiométrica de imagens aéreas digitais por meio de ajuste polinomial. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2008, Recife. **Anais...** Recife, 2008. p. 000-000.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 721 p.

LINDER, W. **Digital photogrammetry: a practical course**. 3. ed. Heidelberg: Springer, 2009. 220 p.

LOPES, R. F. **Formação de imagens multiespectrais por meio de fusão de imagens adquiridas por múltiplas câmaras**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2010.

MCFEETERS, S. K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, 1988, p. 281-293.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 p.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 535 p.

NOBREGA, R. A. A. **Análise do balanceamento de imagens aplicado a fotogrametria**. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo.

NÓBREGA, R. A. A; QUINTANILHA J. A. **Comparative analysis of automatic digital image balancing and standard histogram enhancement techniques in remote sensing imagery**. Revista Brasileira de Cartografia. N. 56. v. 01. p. 55-64. 2004.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher Editora, 1989. 308 p.

POLIDORIO, A. M. **Deteccção de elementos da paisagem urbana em imagens aéreas multiespectrais**. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In: I SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2004, Recife. **Anais...** 1 CD-ROM.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C. **Realce do grau de artificialidade de feições em imagens aéreas coloridas**. Séries em ciências geodésicas: novos desenvolvimentos em ciências geodésicas. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, vol. 3, 2003. p. 277-291. 405 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Editora Parênteses, 2007. 127 p.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 223-227, 1986.

RUY, R. S. **Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmaras digitais de médio formato**. 2008. 229 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente prudente, 2008.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; MENOSSE, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 4, 2008, p. 571-587.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; REIS, T. T.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O.; MAGNA JUNIOR, J. P. Sistema aerotransportado leve de aquisição de imagens digitais – SAAP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 1329-1335.

RUY, R. S. **Geração automática de estereomodelos a partir de imagens digitais georreferenciadas**. 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2004.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3 ed. Burlington: Elsevier, 2007. 515 p.

SILVA, D. C.; CANDEIAS, A. L. B. **Causas da iluminação não uniforme em fotografias aéreas coloridas**. Revista Brasileira de Cartografia. N. 61. V. 2. p. 105-115. 2009.

SOILLE, P. **Morphological image analysis: principles and applications**. Berlin. Springer-Verlag, 1999. 316 p.

SOUSA, R. C. A.; KUX, H. J. H. Comportamento espectral de alvos urbanos: simulação com as bandas espectrais do satélite CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005. p. 1099-1106.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 52, n. 3, p. 397-399, 1986.

TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K. Modernas tecnologias de aquisição de imagens em fotogrametria. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 6, n. 1, 2000, p. 49-64.

## ANEXO A – Distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade

| GL  |        | Limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 50% de probabilidade. |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|-----|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
|     |        | V1                                                                                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
| V2  | 1      | 2                                                                                          | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 20     | 40     | 60     | 120    | 240    |  |
| 1   | 161.4  | 199.5                                                                                      | 215.7  | 224.6  | 230.2  | 234.0  | 236.8  | 238.9  | 240.5  | 241.9  | 243.0  | 243.9  | 244.7  | 245.4  | 245.9  | 246.0  | 251.1  | 252.2  | 253.3  | 253.8  |  |
| 2   | 18.513 | 19.000                                                                                     | 19.164 | 19.247 | 19.296 | 19.329 | 19.353 | 19.371 | 19.385 | 19.396 | 19.405 | 19.412 | 19.419 | 19.424 | 19.429 | 19.446 | 19.471 | 19.479 | 19.487 | 19.492 |  |
| 3   | 10.128 | 9.562                                                                                      | 9.277  | 9.117  | 9.013  | 8.941  | 8.887  | 8.846  | 8.812  | 8.785  | 8.763  | 8.745  | 8.729  | 8.715  | 8.703  | 8.660  | 8.594  | 8.572  | 8.549  | 8.538  |  |
| 4   | 7.709  | 6.944                                                                                      | 6.591  | 6.388  | 6.256  | 6.163  | 6.094  | 6.041  | 5.999  | 5.964  | 5.936  | 5.912  | 5.891  | 5.873  | 5.858  | 5.803  | 5.717  | 5.688  | 5.668  | 5.643  |  |
| 5   | 6.608  | 5.786                                                                                      | 5.409  | 5.192  | 5.050  | 4.950  | 4.876  | 4.818  | 4.772  | 4.735  | 4.704  | 4.678  | 4.655  | 4.636  | 4.619  | 4.558  | 4.464  | 4.431  | 4.398  | 4.382  |  |
| 6   | 5.987  | 5.143                                                                                      | 4.757  | 4.534  | 4.387  | 4.284  | 4.207  | 4.147  | 4.099  | 4.060  | 4.027  | 4.000  | 3.976  | 3.956  | 3.938  | 3.874  | 3.774  | 3.740  | 3.705  | 3.687  |  |
| 7   | 5.591  | 4.737                                                                                      | 4.347  | 4.120  | 3.972  | 3.866  | 3.787  | 3.726  | 3.677  | 3.637  | 3.603  | 3.575  | 3.550  | 3.529  | 3.511  | 3.445  | 3.340  | 3.304  | 3.267  | 3.249  |  |
| 8   | 5.318  | 4.459                                                                                      | 4.066  | 3.838  | 3.688  | 3.581  | 3.500  | 3.438  | 3.388  | 3.347  | 3.313  | 3.284  | 3.259  | 3.237  | 3.218  | 3.150  | 3.043  | 3.005  | 2.967  | 2.947  |  |
| 9   | 5.117  | 4.256                                                                                      | 3.863  | 3.633  | 3.482  | 3.374  | 3.293  | 3.230  | 3.179  | 3.137  | 3.102  | 3.073  | 3.048  | 3.025  | 3.006  | 2.936  | 2.826  | 2.787  | 2.748  | 2.727  |  |
| 10  | 4.965  | 4.103                                                                                      | 3.708  | 3.478  | 3.326  | 3.217  | 3.135  | 3.072  | 3.020  | 2.978  | 2.943  | 2.913  | 2.887  | 2.865  | 2.845  | 2.774  | 2.661  | 2.621  | 2.580  | 2.559  |  |
| 11  | 4.844  | 3.982                                                                                      | 3.587  | 3.357  | 3.204  | 3.095  | 3.012  | 2.948  | 2.896  | 2.854  | 2.818  | 2.788  | 2.761  | 2.739  | 2.719  | 2.646  | 2.531  | 2.490  | 2.448  | 2.426  |  |
| 12  | 4.747  | 3.885                                                                                      | 3.490  | 3.259  | 3.106  | 2.996  | 2.913  | 2.849  | 2.796  | 2.753  | 2.717  | 2.687  | 2.660  | 2.637  | 2.617  | 2.544  | 2.426  | 2.384  | 2.341  | 2.319  |  |
| 13  | 4.667  | 3.806                                                                                      | 3.411  | 3.179  | 3.025  | 2.915  | 2.832  | 2.767  | 2.714  | 2.671  | 2.635  | 2.604  | 2.577  | 2.554  | 2.533  | 2.459  | 2.339  | 2.297  | 2.252  | 2.230  |  |
| 14  | 4.600  | 3.739                                                                                      | 3.344  | 3.112  | 2.958  | 2.848  | 2.764  | 2.699  | 2.646  | 2.602  | 2.565  | 2.534  | 2.507  | 2.484  | 2.463  | 2.388  | 2.266  | 2.223  | 2.178  | 2.155  |  |
| 15  | 4.543  | 3.682                                                                                      | 3.287  | 3.056  | 2.901  | 2.790  | 2.707  | 2.641  | 2.588  | 2.544  | 2.507  | 2.475  | 2.448  | 2.424  | 2.403  | 2.328  | 2.204  | 2.160  | 2.114  | 2.090  |  |
| 16  | 4.494  | 3.634                                                                                      | 3.239  | 3.007  | 2.852  | 2.741  | 2.657  | 2.591  | 2.538  | 2.494  | 2.456  | 2.425  | 2.397  | 2.373  | 2.352  | 2.276  | 2.151  | 2.106  | 2.059  | 2.035  |  |
| 17  | 4.451  | 3.592                                                                                      | 3.197  | 2.965  | 2.810  | 2.699  | 2.614  | 2.548  | 2.494  | 2.450  | 2.413  | 2.381  | 2.353  | 2.329  | 2.308  | 2.230  | 2.104  | 2.058  | 2.011  | 1.986  |  |
| 18  | 4.414  | 3.555                                                                                      | 3.160  | 2.928  | 2.773  | 2.661  | 2.577  | 2.510  | 2.456  | 2.412  | 2.374  | 2.342  | 2.314  | 2.290  | 2.269  | 2.191  | 2.063  | 2.017  | 1.968  | 1.943  |  |
| 19  | 4.381  | 3.522                                                                                      | 3.127  | 2.895  | 2.740  | 2.628  | 2.544  | 2.477  | 2.423  | 2.378  | 2.340  | 2.308  | 2.280  | 2.256  | 2.234  | 2.155  | 2.026  | 1.980  | 1.930  | 1.905  |  |
| 20  | 4.351  | 3.493                                                                                      | 3.098  | 2.866  | 2.711  | 2.599  | 2.514  | 2.447  | 2.393  | 2.348  | 2.310  | 2.278  | 2.250  | 2.225  | 2.203  | 2.124  | 1.994  | 1.946  | 1.895  | 1.870  |  |
| 21  | 4.325  | 3.467                                                                                      | 3.072  | 2.840  | 2.685  | 2.573  | 2.488  | 2.420  | 2.366  | 2.321  | 2.283  | 2.250  | 2.222  | 2.197  | 2.176  | 2.096  | 1.965  | 1.916  | 1.866  | 1.839  |  |
| 22  | 4.301  | 3.443                                                                                      | 3.048  | 2.817  | 2.661  | 2.549  | 2.464  | 2.397  | 2.342  | 2.297  | 2.259  | 2.226  | 2.198  | 2.173  | 2.151  | 2.071  | 1.938  | 1.889  | 1.838  | 1.811  |  |
| 23  | 4.279  | 3.422                                                                                      | 3.028  | 2.796  | 2.640  | 2.528  | 2.442  | 2.375  | 2.320  | 2.275  | 2.236  | 2.204  | 2.175  | 2.150  | 2.128  | 2.048  | 1.914  | 1.865  | 1.813  | 1.785  |  |
| 24  | 4.260  | 3.403                                                                                      | 3.009  | 2.776  | 2.621  | 2.508  | 2.423  | 2.355  | 2.300  | 2.255  | 2.216  | 2.183  | 2.155  | 2.130  | 2.108  | 2.027  | 1.892  | 1.842  | 1.790  | 1.762  |  |
| 25  | 4.242  | 3.385                                                                                      | 2.991  | 2.759  | 2.603  | 2.490  | 2.405  | 2.337  | 2.282  | 2.236  | 2.198  | 2.165  | 2.136  | 2.111  | 2.089  | 2.007  | 1.872  | 1.822  | 1.768  | 1.740  |  |
| 26  | 4.225  | 3.369                                                                                      | 2.975  | 2.743  | 2.587  | 2.474  | 2.388  | 2.321  | 2.265  | 2.220  | 2.181  | 2.148  | 2.119  | 2.094  | 2.072  | 1.990  | 1.853  | 1.803  | 1.749  | 1.720  |  |
| 27  | 4.210  | 3.354                                                                                      | 2.960  | 2.728  | 2.572  | 2.459  | 2.373  | 2.305  | 2.250  | 2.204  | 2.166  | 2.132  | 2.103  | 2.078  | 2.056  | 1.974  | 1.836  | 1.785  | 1.731  | 1.702  |  |
| 28  | 4.196  | 3.340                                                                                      | 2.947  | 2.714  | 2.558  | 2.445  | 2.359  | 2.291  | 2.236  | 2.190  | 2.151  | 2.118  | 2.089  | 2.064  | 2.041  | 1.959  | 1.820  | 1.769  | 1.714  | 1.685  |  |
| 29  | 4.183  | 3.328                                                                                      | 2.934  | 2.701  | 2.545  | 2.432  | 2.346  | 2.278  | 2.223  | 2.177  | 2.138  | 2.104  | 2.075  | 2.050  | 2.027  | 1.945  | 1.806  | 1.754  | 1.698  | 1.669  |  |
| 30  | 4.171  | 3.316                                                                                      | 2.922  | 2.690  | 2.534  | 2.421  | 2.334  | 2.266  | 2.211  | 2.165  | 2.126  | 2.092  | 2.063  | 2.037  | 2.015  | 1.932  | 1.792  | 1.740  | 1.683  | 1.654  |  |
| 40  | 4.085  | 3.232                                                                                      | 2.839  | 2.606  | 2.449  | 2.336  | 2.249  | 2.180  | 2.124  | 2.077  | 2.038  | 2.003  | 1.974  | 1.948  | 1.924  | 1.839  | 1.693  | 1.637  | 1.577  | 1.544  |  |
| 50  | 4.034  | 3.183                                                                                      | 2.790  | 2.557  | 2.400  | 2.286  | 2.199  | 2.130  | 2.073  | 2.026  | 1.986  | 1.952  | 1.921  | 1.895  | 1.871  | 1.784  | 1.634  | 1.576  | 1.511  | 1.476  |  |
| 60  | 4.001  | 3.150                                                                                      | 2.758  | 2.525  | 2.368  | 2.254  | 2.167  | 2.097  | 2.040  | 1.993  | 1.952  | 1.917  | 1.887  | 1.860  | 1.836  | 1.748  | 1.594  | 1.534  | 1.467  | 1.430  |  |
| 80  | 3.960  | 3.111                                                                                      | 2.719  | 2.486  | 2.329  | 2.214  | 2.126  | 2.056  | 1.999  | 1.951  | 1.910  | 1.875  | 1.845  | 1.817  | 1.793  | 1.703  | 1.545  | 1.482  | 1.411  | 1.370  |  |
| 100 | 3.936  | 3.087                                                                                      | 2.696  | 2.463  | 2.305  | 2.191  | 2.103  | 2.032  | 1.975  | 1.927  | 1.886  | 1.850  | 1.819  | 1.792  | 1.768  | 1.676  | 1.515  | 1.450  | 1.376  | 1.333  |  |
| 120 | 3.920  | 3.072                                                                                      | 2.680  | 2.447  | 2.290  | 2.175  | 2.087  | 2.016  | 1.959  | 1.910  | 1.869  | 1.834  | 1.803  | 1.775  | 1.750  | 1.659  | 1.495  | 1.429  | 1.352  | 1.307  |  |
| 240 | 3.881  | 3.033                                                                                      | 2.642  | 2.409  | 2.252  | 2.136  | 2.048  | 1.977  | 1.919  | 1.870  | 1.829  | 1.793  | 1.761  | 1.733  | 1.708  | 1.614  | 1.445  | 1.375  | 1.290  | 1.237  |  |