

Identificação de corpo d'água e sombra em imagens aéreas de alta resolução

Anderson de Freitas Barros ¹
Nilton Nobuhiro Imai ¹

¹ Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Caixa Postal 467 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
rioand@yahoo.com, nnimai@fct.unesp.br

Abstract. This paper applies the enhancement indexes and thresholding algorithms proposed by Polidorio (2007) able to enhance and to identify specific present targets in the urbane scenery registered in the in aerial images of high spatial resolution acquired by the SA-API that operate in the visible spectrum and near infrared bands. The evaluation of the thematic map generated was based on statistics obtained from the error matrix (overall accuracy and kappa index). The obtained results confirm that the proposed approaches can be applied in mapping of urban to recognize and to identify specific targets in the images acquired by the SA-API. However, the initial analyses applied to obtained results led to the necessity of agreement to improve the final results.

Palavras-chave: Remote Sensing, Image Processing, Enhancement Index, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagem, Índice de Realce.

1. Introdução

Entre os avanços tecnológicos incorporados às câmaras fotogramétricas digitais encontra-se o aumento da resolução espectral. Isso permite adquirir dados de imageamento aéreo com maior potencial para discriminação de alvos baseada nos seus comportamentos espectrais.

No contexto de reconhecimento de padrões de alvos específicos da paisagem urbana, Polidorio (2007) propôs o uso de índices capazes de realçar alguns alvos dessa paisagem em imagens multiespectrais. No experimento de Polidorio (2007) foram utilizadas várias imagens aéreas de maior resolução espectral, algumas ortorretificadas, adquiridas em diferentes regiões e por diferentes sensores, dos quais alguns arranjados em diferentes ângulos de visada.

Como alternativa de sistema de aerolevanteamento, foi desenvolvido o Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Digitais (SA-API), numa parceria entre a UNESP e a ENGEMAP. De acordo com Ruy (2008) e Lopes (2010), o resultado desse projeto é um sistema de sensores de quadro capaz de adquirir imagem aérea multiespectral com alta resolução espacial, boa geometria e baixo custo de aquisição.

Nesse contexto, esse trabalho busca aplicar os índices e algoritmos de limiarização propostos por Polidorio (2007) capazes de realçar e identificar alvos específicos como corpo d'água e sombra presentes na paisagem urbana registrados em imagens adquiridas pelo SA-API.

1.1 Índices utilizados e índices propostos por Polidorio (2007)

Segundo Ponzoni e Schimabukuro (2007), o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é utilizado em diferentes abordagens no monitoramento da vegetação. Para Polidorio (2007), trata-se de um índice que realça a vegetação explorando os baixos valores de reflectância desse alvo na faixa do vermelho e valores mais elevados na faixa do infravermelho próximo. A formulação do NDVI é feita através da seguinte equação:

$$NDVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R} \right) \quad (1)$$

O mWI (maximum Water Index), desenvolvido por Polidorio (2007), utiliza os maiores valores de brilho entre as três imagens adquiridas na faixa do visível (ou nas bandas R, G e B

da imagem colorida). Assim, é criada a imagem M composta somente com os maiores valores de brilho registrados entre as três imagens. 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 mWI é feita da seguinte maneira:

$$mWI = \left(\frac{M - NIR}{M + NIR} \right) \quad (2)$$

O nSI (normalized Shadow Index), desenvolvido por Polidorio (2007), realça as regiões sombreadas pela diferença normalizada entre os componentes saturação (S) e intensidade (I) do sistema de cor HSI. Segundo Gonzáles e Woods (1992), nesse sistema, o componente cor é disjuncto dos componentes intensidade e saturação. A equação do nSI é a seguinte:

$$nSI = \frac{S - I}{S + I} \quad (3)$$

O sSI (spectral Shadow Index), desenvolvido por Polidorio (2007), é semelhante ao nSI, mas a diferença está na utilização dos valores de brilho da imagem infravermelha (NIR) em substituição ao componente intensidade (I). Essa substituição promove 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. A equação do sSI é:

$$sSI = \frac{S - NIR}{S + NIR} \quad (4)$$

1.2 Função de transformação de dimensão

Polidorio (2007) definiu a função de transformação de dados dispostos em estruturas bidimensionais (matriz) em unidimensionais (vetores) que possibilita a formulação matemática adequada dos métodos utilizados na identificação de alvos específicos.

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

$$SUM(B) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad (5)$$

O resultado de SUM (B) é a quantidade de elementos da matriz B associados com o valor 1. Seja M a matriz de dimensões m x n que contém valores reais. Seja A a seguinte função de transformação:

$$A_p(B, M) = X_{ij} \quad (6)$$

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 transformação 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 dessa função, é mostrado 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 vetor $X = (1,00 \quad 4,00)$.

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. Metodologia de trabalho

Foram utilizados programas computacionais (ENVI, SPRING, SURF, MATLAB, Editor de Texto e Planilha Eletrônica); imagem aérea na faixa do infravermelho, adquirida pela câmara digital SONY DSCF828 (8 megapixels); e imagem aérea na faixa do visível, adquirida pela câmara digital HASSELBLAD H2D (22 megapixels).

2.1 Escolha da área de estudo

A escolha foi realizada com base na existência dos alvos corpo d'água e sombra presentes nas imagens aéreas. A área de estudo (Figura 1) corresponde à região de área urbana coberta pelas imagens aérea adquiridas pelo SAAPI durante o voo realizado em Tarumã (SP) no dia 25/03/2007.



Figura 1. Área de estudo Tarumã. (a) Imagem no espectro do visível. (b) Imagem infravermelha falsa cor.

2.2 Processamento da imagem

As imagens aéreas utilizadas possuem resoluções espaciais diferentes e, portanto, foi necessário compatibilizá-las. A imagem infravermelha sofreu reamostragem e passou a ser representada com pixel na mesma dimensão espacial da imagem da faixa do visível. O método de interpolação utilizado foi o vizinho mais próximo. O registro das imagens foi realizado pelo modelo de transformação polinomial com base nos pontos homólogos escolhidos nas imagens.

2.3 Aplicação dos índices e algoritmos

Os índices serviram para ressaltar o comportamento espectral dos alvos corpo d'água e sombra presentes nas imagens aéreas. Os algoritmos propostos para a identificação desses alvos 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.

2.4 Procedimentos de identificação de corpo d'água

Para identificar corpos d'água são necessários os seguintes atributos: o componente matiz (H) do sistema de cor HSI, com valores no intervalo 0 a 1; a matriz de índice mWI^* , que é a matriz de índice mWI com valores no intervalo 0 a 1; e a imagem infravermelha original. Com esses atributos são realizados os procedimentos descritos a seguir.

Computar a matriz B

A matriz B é a imagem binária gerada pela condição dada por:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } mWI_{ij}^* > 0,30 \max(mWI_{ij}^*) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

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

O valor de limiar dimensionado evita que algum corpo d'água seja descartado. Então, adota-se um valor de limiar muito seguro, de forma que pixels que correspondem a outros alvos também sejam incluídos, mas procura-se garantir que todos corpos d'água estejam incluídos.

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 1.2. Desse vetor, são extraídos desvio padrão σ_x e média μ_x que serão utilizados nos próximos procedimentos.

Computar a matriz h

A matriz h é a imagem binária gerada pela faixa de restrição no componente matriz (H), que engloba tanto sombras mais escuras quanto tênues, a qual não envolve corpo d'água. Em resumo, a matriz h é gerada pela condição definida a seguir.

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } 0,10 < H_{ij} < 0,58 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

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 σ_x e média μ_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 σ_x e a média μ_x . Se isto ocorrer com a matriz de índice mWI significa que os alvos corpo d'água e sombra 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:

$$k = 0,50 \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right) \quad (9)$$

onde: desvio padrão σ_x e média μ_x são obtidos do vetor X produzido pela combinação de B com mWI.

Computar a matriz W

A matriz W é a imagem binária gerada pela condição definida como:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (mWI_{ij} - k(NIR_{ij})) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

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

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 wrt

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

$$wrt_{ij} = \gamma_B(W_{ij} \cap h_{ij}) \quad (11)$$

onde: γ_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 (γ_B).

2.5 Procedimentos de identificação de sombra

Para identificar sombra são necessários os seguintes atributos: as matrizes de índices NDVI, nSI e sSI; a matriz wrt; e a imagem infravermelha original, sem quaisquer alterações nos valores de brilho, com valores no intervalo 0 a 1. Com esses atributos são realizados os procedimentos descritos a seguir.

Computar a matriz sw

A matriz sw é a imagem binária gerada pela condição dada por:

$$sw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} > NIR_{ij}) \text{ ou } (\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

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 a imagem binária que representa as sombras. Sua equação é dada por:

$$shd_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (sw_{ij} - wrt_{ij}) > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

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, o operador de diferença utilizado na expressão $(sw_{ij} - wrt_{ij})$ serve para garantir a exclusão de corpo d'água, identificado indevidamente.

2.6 Análise, ajuste e qualidade do resultado da identificação

Os resultados obtidos pela 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 utilizou a matriz de erros, também conhecida como matriz de confusão. De acordo com Chuvieco (2002), essa matriz tem a capacidade de destacar os conflitos entre as classes definidas e com isso, oferecer a exatidão global e o coeficiente *kappa*.

Foram utilizados 100 elementos amostrais na avaliação da qualidade do mapa temático, pois, Hay (1979) e Congalton (1991) sugerem utilizar 50 pixels em cada classe. Não foi utilizada a estatística clássica para determinar o tamanho da amostra, pois, de acordo com Chuvieco (2002), ela pode oferecer tamanho da amostra, ou número necessário de pontos, muito pequeno se comparado ao total de pixels da imagem.

Portanto, numa área da imagem, foram lançados 3 conjuntos de amostras, cada qual com 100 elementos amostrais, ou seja, 50 elementos para cada classe temática. 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.

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*.

3. Resultados e Discussão

Foram apresentados dois tipos de resultados: (a) resultado obtido pela aplicação dos procedimentos desenvolvidos por Polidório (2007); e (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 pelos procedimentos sem ajustes e o do tipo (b), de imagem obtida pelos procedimentos com ajustes.

Na identificação de corpo d'água, os procedimentos mostraram que a representação de 30% (0,30) do valor máximo de mWI_{ij}^* contribuiu pouco na representação desse alvo. Porém, ao utilizar 15% (0,15) do valor máximo de mWI_{ij}^* ocorreu 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 μ_x e o desvio padrão σ_x , não foi suficiente para representar o alvo. Mas, quando o valor *k* foi constituído por 75% (0,75) dessa relação, ele apresentou um significativo aumento na identificação de corpo d'água.

Portanto, para ter um resultado satisfatório no procedimento de identificação de corpo d'água a matriz B e a o valor *k* devem ser representados por:

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } mWI_{ij}^* > 0,15 \max(mWI_{ij}^*) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (14)$$

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

$$k = 0,75 \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right) \quad (15)$$

onde: desvio padrão σ_x e média μ_x são obtidos do vetor X produzido pela combinação de B com mWI.

A Figura 2 mostra os resultados obtidos na identificação de corpo d'água pelos procedimentos sem ajuste e com ajuste, respectivamente.

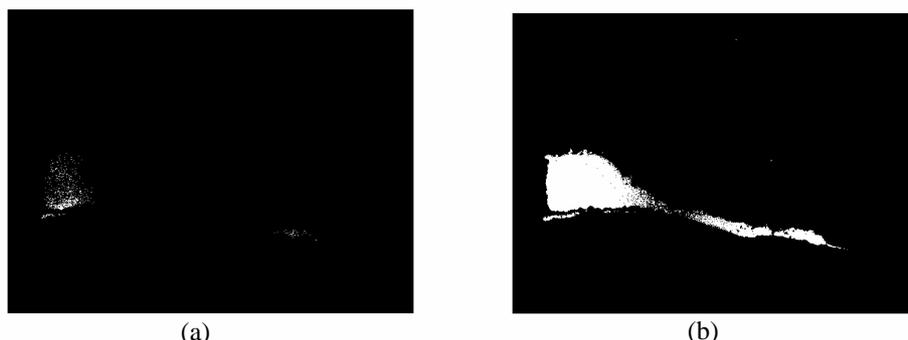


Figura 2. Imagens binárias wrt obtidas pelos procedimentos (a) sem ajuste e (b) com ajuste.

A Figura 2(b) 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, como pode ser visto na Figura 1(b).

Na identificação de sombra, houve pouca contribuição da expressão definida por $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$ ou $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > 0$. Num conjunto de 100 elementos amostrais, dos quais vegetação, solo, via pavimentada, sombra e água, foi verificado que o menor valor de sombra foi $-0,4910$. Com isso, a nova expressão passou a ser $(\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > -0,55$. Porém, muitos pontos de vegetação foram identificados como sombra na expressão $(NDVI_{ij} > NIR_{ij})$. Para corrigir essa identificação equivocada, foi aplicado o fator de escala 1,50 no componente NIR. Com isso, a nova expressão passou a ser $(NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij}))$. Portanto, para ter um resultado satisfatório no procedimento de identificação de sombra a matriz sw deve ser representada pela condição:

$$sw_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } (NDVI_{ij} > 1,50(NIR_{ij})) \text{ ou } (\min(nSI_{ij}, sSI_{ij}) - NIR_{ij}) > -0,55 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

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

A Figura 3 mostra os resultados obtidos na identificação de sombra pelos procedimentos sem ajuste e com ajuste, respectivamente.

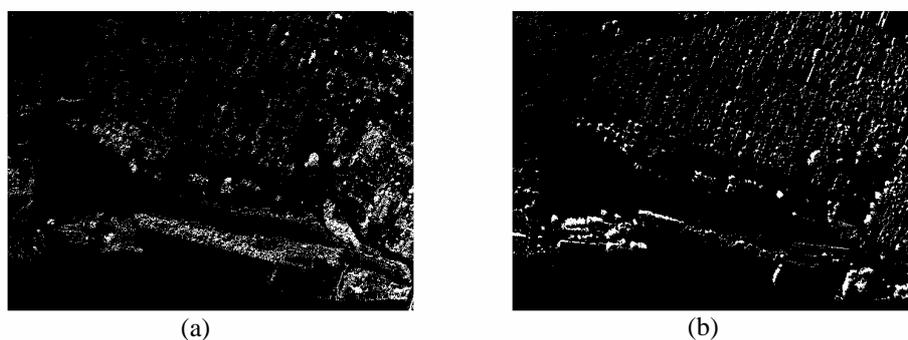


Figura 3. Imagens binárias shd obtidas pelos procedimentos (a) sem ajuste e (b) com ajuste.

Para a análise da qualidade dos resultados obtidos pelos procedimentos com ajustes, a matriz de confusão foi preenchida e dela calculados a exatidão global e o coeficiente $kappa$, mostrados a seguir.

Os valores de exatidão global e coeficiente $kappa$ da classe corpo d'água foram 0,93 e 0,85; e da classe sombra, 0,98 e 0,90, respectivamente.

Tabela 1. 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

Tabela 2. Matriz de confusão (sombra).

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

De acordo com a avaliação do valor kappa proposta por Landis e Koch (1977), na área escolhida, a qualidade dos mapas temáticos obtidos na identificação dos alvos corpo d'água e sombra foi classificada como EXCELENTE, pois os coeficientes *kappa* estão entre 0,81 a 1,00.

4. Conclusões

Os resultados obtidos confirmam 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 que operam nas faixas do visível e do infravermelho próximo.

Porém, as análises iniciais aplicadas aos resultados obtidos pelos procedimentos definidos por Polidório (2007) conduziram à necessidade de ajuste 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.

Referências Bibliográficas

- CHUVIECO, E. **Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio**. 1. ed. Barcelona: Ariel Ciência, 2002. 586 p.
- 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.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n.1, p. 159-174, 1977.
- 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.
- POLIDÓRIO, A. M. **Deteção 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.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Editora Parênteses, 2007. 127 p.
- RUY, R. S. et al. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 4, 2008, p. 571-587.