

USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA COBERTURA VERDE NO PERÍMETRO URBANO DA CIDADE DE MANAUS

DAYSON JARDIM-LIMA¹
BRUCE WALKER NELSON¹

¹INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
Dept^o de Ecologia - Av. André Araújo 2936 - 69083-000 - Manaus - AM, Brasil
dj Jardim@inpa.gov.br
bnelson@internext.com.br

Abstract. Eight vegetation indices were tested for monitoring expansion of the city of Manaus from 1985 to 1999, using Landsat TM images. Indices were NDVI $[(b4-b3)/(b4+b3)]$, inverted NDSI $[(b4-b5)/(b4+b5)]$, and SAVI $[(1+L)*(b4-b3)/(b4+b3+L)]$, the latter with six different L values: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 1.0. For each index, the threshold between classes "urban" and "green" was based on the same set of reference pixels in the 1985 image. All dates were radiometrically intercalibrated with 1985 and all converted to top-of-atmosphere reflectance. Reliability of each index's threshold between the two land cover classes was examined in a primary forest polygon near the city. For the SAVI indices, percent of forest incorrectly identified as urban increased from 0.16% to 14.06%, for L values 0.1 to 1.0. NDVI (threshold = 0.539) and inverted NDSI (threshold = 0.095) did not identify any forest pixels as urban. Over the 14 years, urban expansion, including internal loss of green cover, proceeded at a rate of 652 ha year⁻¹ based on NDVI, or 670 ha year⁻¹ based on inverted NDSI.

Keywords: urban expansion, vegetation index, NDVI, SAVI, NDSI.

1. Introdução

Os índices de vegetação foram concebidos com a finalidade de ressaltar a resposta espectral da vegetação em função do fechamento de seu dossel sobre o solo (Jackson e Huete, 1991). Uma das vantagens citadas por Moreira (1992), para o uso de índices de vegetação, é a obtenção de uma banda com significado físico, ou seja, o índice de vegetação é um número altamente correlacionado com a fitomassa verde e com o grau de cobertura do solo por vegetação verde.

Vários cientistas têm desenvolvido índices de vegetação para avaliação qualitativa e quantitativa da cobertura vegetal, usando medidas espectrais. Estes índices são afetados por vários fatores, visto que a resposta espectral de áreas vegetadas é uma complexa mistura de vegetação, da média do brilho do solo em todas as bandas do sensor (*soil brightness*) e o brilho do solo em cada faixa do espectro (*soil color*), de efeitos ambientais, sombra e umidade. Além disso, estes índices são afetados pela variação espacial-temporal da atmosfera (Bannari et al., 1995).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI é muito simples, resultante da diferença entre a reflectância no infravermelho próximo (TM banda 4) e reflectância no vermelho (TM banda 3); esta razão é, então, normalizada pela soma das duas reflectâncias (Eastman, 1999):

$$NDVI = (IVP - V) / (IVP + V) \quad (1)$$

onde IVP = reflectância na faixa do infravermelho próximo; V = reflectância na faixa do visível vermelho. Com o aumento da cobertura vegetal, a reflectância na região do vermelho tende a diminuir, enquanto no infravermelho próximo tende a aumentar, devido às propriedades espectrais contrastantes de vegetação e solo.

Segundo Qi et al. (1993) e Epiphanyo e Huete (1995), o NDVI é extremamente sensível a vários fatores externos, principalmente geometria de iluminação, propriedades ópticas do solo abaixo do dossel e efeitos atmosféricos.

Uma adaptação do índice NDVI decorre da substituição da banda vermelha (TM banda 3) pela banda infravermelha média (TM banda 5), aqui chamado Índice de Vegetação utilizando o Infravermelho Médio (Índice-IVM):

$$\text{ÍNDICE-IVM} = (\text{IVP} - \text{IVM}) / (\text{IVP} + \text{IVM}) \quad (2)$$

onde IVM = reflectância na faixa do infravermelho médio. Esse processo se justifica em função da TM banda 5 refletir mais fortemente o solo exposto que a banda 3 e sofrer menos interferências de elementos atmosféricos, além de estar relacionada com informações do conteúdo hídrico na massa foliar.

O índice IVM tem uma relação inversa linear ($y = -x$) com o NDSI (*Normalized Difference Soil Index*) de Kearney et al. (1995), sendo essencialmente o mesmo índice. Segundo Miura et al. (1998), índices como o IVM, criados a partir do MODIS, mostraram-se proveitosos na discriminação de áreas florestadas, mas não foi verificada boa performance em áreas não-florestadas como áreas queimadas e com pastagens limpas e sujas.

A sensibilidade do NDVI para o solo visível abaixo do dossel e efeitos atmosféricos, entre outros, tem gerado um crescente interesse no desenvolvimento de novos índices, tal como o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (*Soil-Adjusted Vegetation Index - SAVI*). Variações no brilho do solo tem forte influência sobre o NDVI, o que é indesejável quando se procura saber apenas o grau de cobertura verde. O relacionamento entre as reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho, para solos variando de escuros a claros, é geralmente linear, ou seja, o solo sempre cai ao longo de uma linha no plano cartesiano definido pelas reflectâncias das duas bandas, IVP e V. Na medida em que qualquer destes solos é coberto com vegetação, a posição do *pixel* se afasta perpendicularmente desta linha do solo. O SAVI (Huete, 1988) está entre um grupo de índices de vegetação que medem ou aproximam a distância entre o *pixel* e a linha do solo, assim retirando o efeito dos solos claros ou escuros. Este é calculado como:

$$\text{SAVI} = (1 + L) * (\text{IVP} - \text{V}) / (\text{IVP} + \text{V} + L) \quad (3)$$

onde IVP = reflectância na faixa do infravermelho próximo, V = reflectância na faixa do visível vermelho e L uma constante de ajuste. Tal como o NDVI e IVM, é necessário utilizar valores de reflectância e não valores de DN. Observe que quando o $L = 0$, o SAVI é igual ao NDVI. Segundo Huete (1988), o valor do coeficiente L escolhido deve ser menor quanto mais densa for a vegetação. Para efeitos práticos, ele indica três fatores de ajuste preferíveis: $L = 1$ para análises com vegetação de muito baixa densidade de cobertura; $L = 0,5$ para vegetação com densidade intermediária, e $L = 0,25$ para altas densidades. O autor considera $L = 0,5$ o melhor fator de ajuste para reduzir razoavelmente os efeitos de solos com diferentes valores de brilho.

2. Objetivo

Comparar e avaliar a confiabilidade dos índices de vegetação NDVI, SAVI e Índice-IVM no monitoramento da perda de vegetação na cidade de Manaus e entorno, no período de 1985 a 1999.

3. Metodologia

A área de estudo corresponde à área urbana da cidade de Manaus e entorno, indicado aproximadamente pela linha branca na **Figura 1**. Os limites precisos seguem o igarapé do Tarumã ao oeste, igarapé da Bolívia e Reserva Florestal Adolpho Ducke ao norte, os lagos de Puraquequara e Aleixo ao leste, e os rios Amazonas e Negro ao sul e sudoeste.

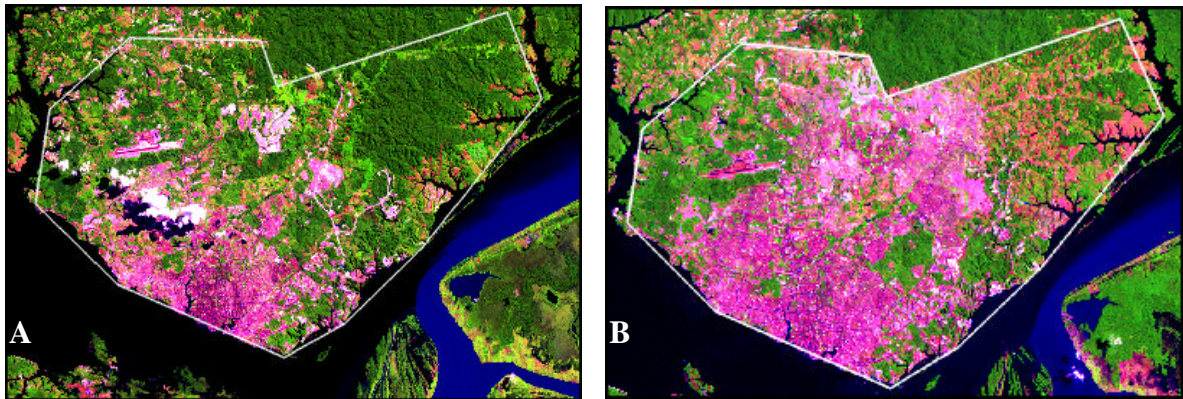


Figura 1. Vista geral da cidade de Manaus. Composição colorida falsa cor (B3G4R5) da cidade de Manaus nos anos de 1985 (A) e 1999 (B) . Linha branca é o limite aproximado da área de estudo.

Foi elaborada uma máscara que elimina os *pixels* fora da área de estudo e os *pixels* cobertos por nuvens e sombras presentes em qualquer uma das seis imagens da série temporal (**Figura 2**). As nuvens e sombras somam menos de 5% da área de estudo, restando 38.983 ha para análise (em verde na figura).

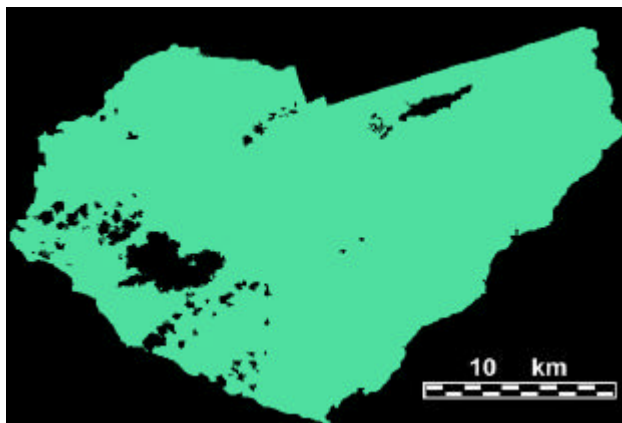


Figura 2. Área de estudo com a máscara de nuvens e sombra.

3.1. Dados de sensoriamento remoto e pré-processamento digital das imagens

As imagens digitais utilizadas neste estudo, do sensor Mapeador Temático do satélite Landsat-5, foram da órbita/ponto 231-062, bandas 3, 4 e 5, referentes às datas de passagem do satélite em 06 de julho de 1985, 15 de agosto de 1988, 08 de agosto de 1991, 19 de outubro de 1994, 07 de julho de 1997 e 15 de setembro de 1999. As imagens foram obtidas do INPE ou NASA, através de diversos projetos de colaboração com INPA.

A imagem de 1999 foi adquirida com correção geométrica e serviu de imagem referência para a correção espacial relativa efetuada em todas as outras imagens. Foram identificados 25 pontos de controle distribuídos regularmente por toda a cena. A função de mapeamento utilizada foi de terceiro grau (cúbica), necessário devido à distorção panorâmica na varredura do Landsat. Os valores de brilho das imagens corrigidas foram computados pelo método do vizinho mais próximo.

A intercalibração radiométrica entre datas (DN x DN) foi relativa e empírica, utilizando-se como referência a imagem de 1985, adquirida em condições de atmosfera extremamente limpa e com o sensor ainda novo. Uma função linear de correção em determinada banda foi

estabelecida por regressão linear entre os valores de brilho na imagem 1985 e os valores de brilho na imagem a ser corrigida. O método requer a escolha de alvos claros e escuros em cada banda, espectralmente imutáveis ao longo do tempo. Para as três bandas, o alvo escuro foi a água do rio Negro em áreas profundas sem sedimento. A floresta primária de terra firme em platô foi um alvo de brilho médio nas bandas TM 4 e 5 e alvo escuro na banda TM 3. Polígonos estáveis no centro da cidade de Manaus servira, de alvos claros para todas as bandas.

Valores de reflectância aparente (reflectância no topo da atmosfera, padrão 1985) foram calculados utilizando os valores pré-lançamento de E_{sol} , L_{max} e L_{min} para cada banda; a distância Terra-Sol e o ângulo zenital do Sol na data e hora de aquisição da imagem de referência radiométrica (1985).

3.2. Índices de vegetação e escolha do limiar entre cobertura verde e urbana

Os oito índices avaliados neste projeto foram o NDVI, o IVM e o SAVI, este último com seis diferentes valores de L: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 e 1.0. Foi criada uma composição colorida das bandas TM 3, 4 e 5 de 1985, com a ampliação de contraste, para identificar visualmente 50 *pixels* não contíguos, dentro da área antropizada, que aparentavam estar no limiar da transição entre as duas classes, "urbana" e "cobertura vegetal rala". A média de determinado índice, nesta população de 50 *pixels*, constitui seu limiar. Este procedimento permitiu padronizar a escolha do limiar em cada imagem índice de vegetação, pois os mesmos *pixels* de 1985 foram utilizados para todos os índices e as outras datas foram radiometricamente intercalibradas com a imagem de 1985.

3.3. Confiabilidade do índice: confusão e sensibilidade a névoa

Índices pouco sensíveis à variação temporal ou espacial de névoa são desejáveis, desde que não identifiquem *pixels* de floresta como sendo urbanos, ou vice-versa. A confiabilidade de cada índice (confusão), foi avaliada em um polígono de floresta densa adjacente à área de estudo, sempre na imagem de 1985. A sensibilidade à névoa foi avaliada utilizando a imagem de 1985, a única que tem a população de treinamento de 50 *pixels* cuja média em cada banda representa, espectralmente, o limiar entre as classe "urbana" e "vegetação rala".

Névoa foi acrescentada às bandas da imagem 1985, efetuando a intercalibração radiométrica empírica (DN x DN) com as mesmas bandas adquiridas em 1991, quando toda a cena 231-062 apresentava uma névoa homogênea. Assim, após este procedimento, a imagem de 1985 aparenta ter sido adquirida sob as mesmas condições de sensor, de iluminação e de atmosfera que aquela adquirida em 1991 (Hall et al., 1991). As três bandas de 1985 com sua névoa virtual, foram então transformadas em reflectância utilizando a distância Terra-Sol e o ângulo zenital do Sol na data e hora de aquisição da imagem de 1991, para determinar a reflectância no topo da atmosfera. As bandas de 1985 em unidades de reflectância, com névoa, foram utilizadas para criar as oito imagens índice de vegetação. Em cada imagem índice com névoa, foi, então, obtida a média dos valores dos 50 *pixels* considerados típicos do limiar de corte entre as classe "urbana" e "vegetação rala". Para cada uma das oito índices, obtêm-se finalmente duas estimativas de área urbana em 1985, uma com pouca névoa e outra com muita névoa homogênea. Os oito pares de valores para o tamanho da mancha urbana em 1985 foram plotados em gráfico e seus afastamentos da linha de $X = Y$ avaliados visualmente. Quanto maior o afastamento, mais sensível seria o índice a problemas de névoa.

4. Resultados

A **Tabela 1** indica os valores médios dos limiares, os coeficientes de variação e o erro na identificação de floresta densa, para cada índice. O índice SAVI identifica incorretamente a floresta densa como sendo área urbana e o erro aumentou com o valor do L. A relação entre L e este tipo de confusão foi linear (% erro = $15.75L - 1.34$; $R^2 = 0.99$). Nenhum *pixel* de floresta primária foi incorretamente identificada pelos índices NDVI (limiar = 0.539) ou IVM (limiar = 0.095).

Na **Figura 3** verificamos que nenhum dos índices é fortemente afetado pela presença de névoa, pois todos são próximos da linha 1:1. A maior sensibilidade à falta de intercalibração foi constatada no índice IVM (20,5% da área de estudo identificada como mancha urbana em imagem com névoa, versus 22,6% sem névoa). A **Figura 3** também demonstra que os índices fornecem diferentes estimativas do tamanho da área urbana em 1985, apesar de serem baseados nos mesmos 50 *pixels* de treinamento. Pelo IVM, a mancha urbana representa 23% da área de estudo. Esta porcentagem é 29% pelo NDVI e 30% pelo SAVI com $L=0.1$. Com o incremento do valor do L, os índices SAVI superestimam progressivamente a mancha urbana, atingindo um estimativa de 38% da área de estudo para o SAVI com $L=1$. Por este motivo, descartamos o índice SAVI.

Embora as áreas estimadas sejam diferentes, as taxas de perda de cobertura vegetal indicadas pelos índices NDVI e IVM são similares (**Figura 4**). A inclinação da reta é a taxa anual. Pelo limiar do NDVI, a perda de cobertura vegetal em Manaus nos 14 anos prosseguiu a uma taxa de 652 ha ano^{-1} , o que representa uma perda total de 9.543 hectares no período. Pelo IVM, a taxa foi 670 ha ano^{-1} , o que corresponde à perda de 9.383 ha de cobertura verde em 14 anos. Em 1999 sobrava, como cobertura verde, 18.230 ha (47% da área de estudo) pelo NDVI, ou 20.770 ha de (53% da área de estudo) pelo IVM.

Tabela 1. Limiares dos índices de vegetação e porcentagem de *pixels* de floresta densa identificadas como área urbana.

Índice de vegetação ¹	Limiar urbana/vegetação ²	Coefficiente de Variação	% da floresta densa identificada como área urbana
NDVI	0,539	0,27	0,00
IVM	0,095	0,47	0,00
SAVI L=0,1	0,447	0,27	0,16
SAVI L=0,2	0,391	0,27	1,4
SAVI L=0,3	0,354	0,27	3,3
SAVI L=0,4	0,327	0,27	4,9
SAVI L=0,5	0,307	0,27	7,5
SAVI L=1,0	0,253	0,26	14,06

¹ Valores negativos foram reclassificados para 0,01, para evitar confusão com a máscara (=0), resultando em exagero do coeficiente de variação do IVM.

² Unidades da segunda coluna são reflectância aparente, padrão sensor/iluminação/atmosfera de 1985.

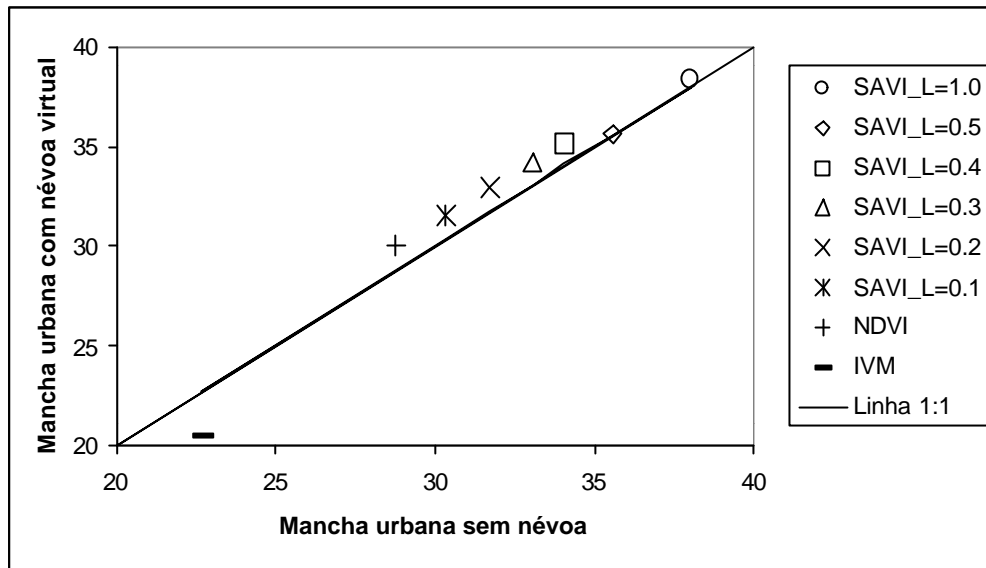


Figura 3. Área da mancha urbana em 1985 (% da área de estudo), calculada com e sem névoa. Afastamento da linha 1:1 indica sensibilidade à névoa. Os altos valores para estimativa da área da mancha urbana obtidos pelo SAVI decorrem da identificação incorreta de pixels de floresta como sendo pixels urbanos.

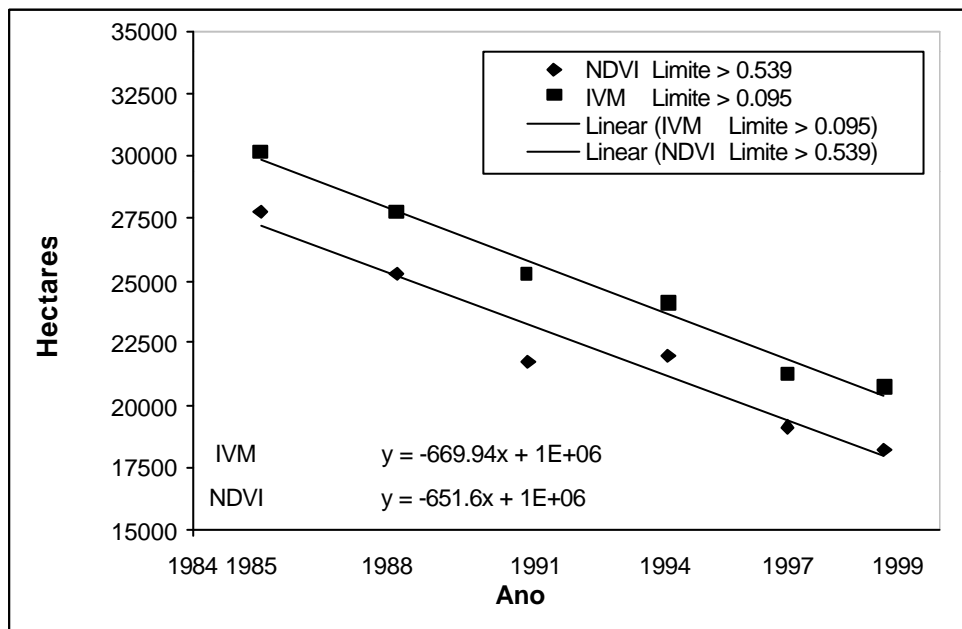


Figura 4. Evolução temporal de cobertura vegetal na cidade de Manaus, no período de 1985 a 1999, indicada pelos índices NDVI e IVM.

5. Conclusões

As imagens índice de vegetação NDVI e IVM permitiram alcançar o objetivo proposto, confirmando sua aplicabilidade como ferramenta no monitoramento de cobertura verde em área urbana. Ou seja, não confundiram áreas florestadas como sendo áreas urbanas. O mesmo resultado não foi verificado para o índice SAVI, apresentando confusão entre as duas classes de cobertura do solo citadas. A perda temporal de cobertura verde na cidade de Manaus, no período de 14 anos, ocorreu a uma taxa de 650 ha ano⁻¹ a 670 ha ano⁻¹, quase dois hectares por dia. Entre 1985 e 1999, verificou-se uma redução de aproximadamente 9,500 ha de cobertura verde na área de estudo.

Referências

- Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F.; Huete, A.R. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, v. 13, n. 1-2, p. 95-120, 1995.
- Eastman, J. R. *Idrisi 32: Guide to GIS and Image Processing*. Clark University: Worcester, v. 1, 193 p. e v. 2, 170 p., 1999.
- Epiphanyo, J.C.N.; Huete, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sens. Environ.*, v. 51, p. 351-360, 1995.
- Hall, F.G.; Stebel, D.E.; Nikeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sens. Environ.*, v. 35, p. 11-27, 1991.
- Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, v. 25, p. 53-70, 1988.
- Jackson, R.D.; Huete, A.R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, v. 11, n. 2, p. 185-200, 1991.
- Kearney, M.S.; Rogers, A.S.; Townshend, J.R.G.; Lawrence, W.T.; Dorn, K.; Eldred, K.; Stutzer, D.; Lindsay, F.; Rizzo, E. Developing a model for determining coastal marsh "health", *Third Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Seattle, Washington, p. 527-537, 1995.
- Miura, T.; Huete, A.R.; van Leeuwen, W.J.D.; Didan, K. Vegetation detection through smoke-filled AVIRIS images: an assessment using MODIS bandpasses. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, v. 103, n. D24, p. 32001-32011, 1998.
- Moreira, M.A. *Análise de Dados do Landsat/TM e do SPOT/XS Através de Índices de Vegetação - Fase II*. São José dos Campos: INPE (INPE-5450-RPQ/663). 17p., 1992.
- Qi, J.; Huete, A.H.; Moran, M.S.; Chehbouni, A.; Jackson, R.D. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images. *Remote Sens. Environ.*, v. 44, p. 89-101, 1993.