



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.3.2.2018.1765.200-209



Identificação dos índices de vegetação com melhores respostas espectrais para a Mata Atlântica na cidade de São Paulo-SP

Identification of vegetation indices with best special answers for the Atlantic Forest in the city of São Paulo-SP

Sidney Henrique Campelo de Santana^a, Elisabeth Regina Alves Cavalcanti Silva^b, Maria Lucielle Silva Laurentino^c, José Gustavo da Silva Melo^a, Josicléda Domiciano Galvêncio^a

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente-PRODEMA, 6º andar, Sala 607, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50.670-90. E-mail: sidneisantana.geo@gmail.com, josegustavo_melo@hotmail.com, josicleda@gmail.com.

^b Instituto Federal do Maranhão, Campus Alcântara, Maranhão, Departamento de Engenharia Ambiental, Rua da Baronesa, Alcântara-MA, Brasil. CEP: 65250-000. E-mail: elisabeth.silva@ifma.edu.br.

^c Universidad de Valladolid, Cidade de Valladolid, Provincia de Valladolid, Comunidade Autônoma de Castilla y León, Espanha. E-mail: lucielleu@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 27 Dez 2017

Aceito 03 Abr 2018

Publicado 16 Abr 2018

ABSTRACT

The Atlantic Forest represents great environmental relevance because of its rich biodiversity. However, this biome has been constantly degraded by human action, which has encouraged the adoption of more adequate techniques of environmental monitoring. In this sense, remote sensing techniques have fundamental importance for the strategies of environmental conservation that can mitigate the environmental degradation of the Forest, besides proposing new possibilities of the use of parameters for the environmental monitoring as the vegetation indices, from satellite images. The study aimed to analyze the applicability of vegetation indices in the city of São Paulo-SP. Subsequently, the most elaborated vegetation indexes, such as NDVI, SAVI, EVI and IAF were obtained, as well as poorly worked indexes such as SARVI and AFRI of the images. Geometric and atmospheric correction were applied to the vegetation indexes and Pearson correlation was performed to determine the affinity between the indices. The results showed that all the indexes presented good correlation in the areas, except the AFRI. The SARVI with atmospheric correction was the one that best correlated with the other IVs, indicating that this study is important to promote the discussion of the performance of the IVs and the interaction between them, as well as the importance of the indices for applicability in the study of forest fragments.

Keywords: Forest fragments, environmental degradation, remote sensing, correlation.

RESUMO

A Mata Atlântica representa grande relevância ambiental em razão da sua rica biodiversidade. No entanto esse bioma tem sido constantemente degradado pela ação humana, o que tem incentivado a adoção de técnicas mais adequadas de monitoramento ambiental. Nesse sentido, técnicas de sensoriamento remoto possuem fundamental importância para as estratégias de conservação ambiental que possam mitigar a degradação ambiental da Mata, além de propor novas possibilidades de utilização de parâmetros para o monitoramento ambiental como os índices de vegetação, a partir de imagens de satélite. O estudo objetivou analisar a aplicabilidade dos índices de vegetação na cidade de São Paulo-SP. Posteriormente foram obtidos os índices de vegetação mais trabalhados atualmente, tais como o NDVI, SAVI, EVI e o IAF, bem como índices pouco trabalhados como SARVI e AFRI das imagens. Foi aplicada a correção geométrica e atmosférica nos índices de vegetação e realizada a correlação de *Pearson* para averiguar a afinidade

entre os índices. Os resultados mostraram que todos os índices apresentaram boa correlação nas áreas, exceto os AFRIs. O SARVI com correção atmosférica foi o que melhor se correlacionou com os demais IVs, indicando este estudo ser importante para promover a discussão do desempenho dos IVs e a interação entre eles, bem como a importância dos índices para aplicabilidade nos estudos de fragmentos de mata.

Palavras-Chave: Fragmentos florestais, degradação ambiental, sensoriamento remoto, correlação.

Introdução

A Mata Atlântica, além da rica biodiversidade, apresenta relevância ambiental, considerando os padrões climáticos e os recursos hídricos, fatores essenciais para a qualidade de vida do homem. Nas áreas urbanas, os fragmentos de mata, Áreas de Proteção Ambiental (APAs) e parques ecológicos promovem conforto térmico, amenização da poluição e significado paisagístico, são, também, importantes áreas de lazer. Neste sentido, diversas técnicas de Sensoriamento Remoto (SR), aliadas ao geoprocessamento, têm sido utilizadas visando acompanhar a condição dos fragmentos de mata em áreas urbanas.

Dentre essas técnicas está a aplicação de índices de vegetação (IVs), os quais utilizam os níveis de reflectância em determinados comprimentos de onda, ou seja, em intervalos da “faixa espectral”. Tais índices permitem discriminar a vegetação através de sua estrutura e desempenho fotossintético, podendo ser aplicados em nível orbital, utilizando sensores multiespectrais e hiperespectrais.

Dentre os mais utilizados, se encontra o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o qual, de acordo com Jensen (2009), é importante por monitorar mudanças sazonais no desenvolvimento e atividade da vegetação. No entanto, o NDVI, assim como os demais índices de vegetação, apresenta uma série de limitações, o que implica na necessidade de utilizar os IVs de forma integrada, analisando-os e confrontando-os. Deste modo, os índices foram sendo elaborados e melhorados com o objetivo de atender as demandas específicas de acordo com as condições ambientais de cada área.

O interesse fundamental no estudo da vegetação, envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, segundo Ponzoni (2002), tem como princípio a compreensão da “aparência” que uma determinada cobertura vegetal assume em um dado produto de sensoriamento remoto, a qual é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais.

O comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia externa e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão, portanto, diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos (Ponzoni &

Shimabukuro, 2007). A assinatura espectral da vegetação, considerada em estudos, tem como fator principal as atividades fotossintéticas e os níveis pigmentares, o que Jensen (2009) define como os principais fatores que controlam a reflectância foliar.

Índices não tão convencionais podem ser aplicados em determinadas áreas e apresentar melhor desempenho que os índices mais utilizados e discutidos como o Índice de Vegetação ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Vegetação Realçado (EVI), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Normalizada da Água (NDWI) (Silva et al., 2011; Silva et al., 2015a).

Exemplos desses índices são o Índice com Correlação Atmosférica (SARVI) e o Índice de Vegetação Livre de Aerossóis (AFRI). O primeiro apresenta fatores de correção do solo e da atmosfera, o segundo se apresenta com uma proposta de ser livre aos efeitos da atmosfera, principalmente aos gases urbanos e poluentes.

Sendo assim, tais índices podem mostrar bom desempenho em áreas urbanas, e clima úmido, onde esses fatores se destacam, que é o caso de grandes metrópoles brasileiras, próximas ao litoral. Por conseguinte a aplicação de análises estatísticas, as quais trabalham com os valores numéricos resultantes dos IVs, são de fundamental importância, não só para a validação dos dados, mas também por permitir diagnósticos mais precisos, além de correlacionar melhor os índices entre si.

Dessa forma o objetivo do estudo foi avaliar as respostas espectrais da Mata Atlântica com base nos índices de vegetação SAVI, EVI, NDVI, NDWI além de índices mais novos como o SARVI e o AFRI. Espera-se com o trabalho a identificação dos melhores índices frente às condições edafoclimáticas do município de São Paulo para identificação do nível de degradação e fragmentação que este bioma apresenta na área estudada salientando-se o potencial desse estudo para futuras estratégias de monitoramento e preservação ambiental.

Material e Métodos

No início do período colonial no Brasil, se formaram as primeiras vilas na região do Estado de São Paulo. Mais tarde, com a chegada do

advento do cultivo do café, o crescimento populacional desta cidade ocorreu de forma acelerada, fato que se agravou com a revolução industrial. Como resultado, ela se configurou como a maior cidade do Brasil, com uma mancha urbana (Figura 1) que se estende por outros municípios e tende a formar um elo com a metrópole do Rio de Janeiro. O município de São Paulo está situado sobre o domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, sob o maior efeito da

continentalidade. O clima tropical sobre São Paulo caracteriza-se por chuvas intensas e tempestuosas no período de verão, enquanto, no inverno, os níveis de precipitação decrescem, assim como as temperaturas. A relativa distância do oceano, além da urbanização mais extensa, condiciona uma situação atmosférica mais agravada, com maior número de gases, partículas e poluentes na atmosfera e causando efeitos sobre a vegetação.

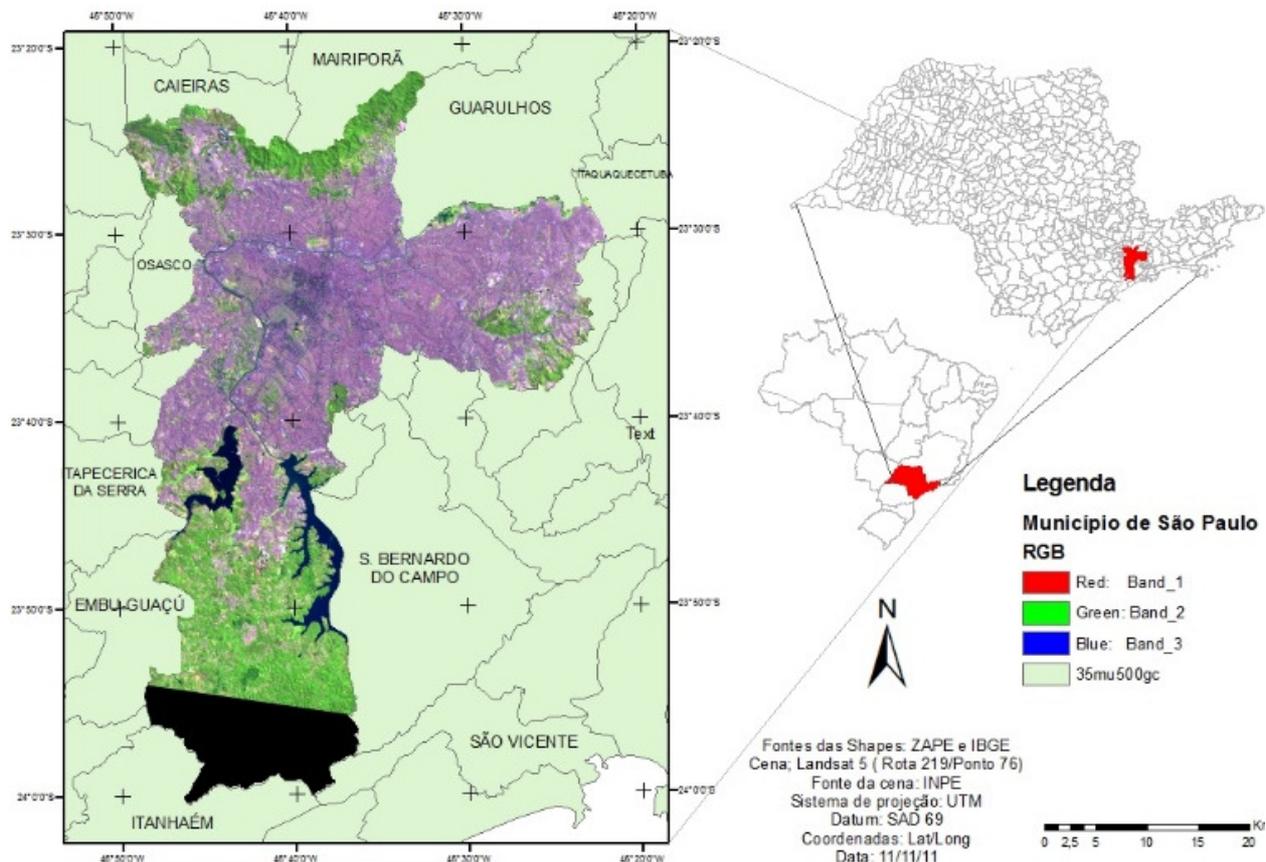


Figura 1. Localização espacial do município de São Paulo-SP. Fonte: Autores (2017).

Aquisição das imagens do Landsat

Inicialmente foram obtidas imagens do satélite Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*), disponibilizadas no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foi selecionada uma cena referente à cidade de São Paulo, com data de registro de 03 de setembro de 2008, com órbita e ponto 219-76.

Processamento dos dados matriciais

Todas as bandas da cena foram empilhadas de modo a formar um produto com sete bandas, correspondentes a determinados intervalos da faixa do espectro. O empilhamento das bandas foi realizado no *software* Erdas Imagine 9.3, com licença adquirida pelo Grupo de Pesquisa “Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento” (SERGEO), assim como os

demais processamentos das imagens descritos adiante.

Posteriormente, foi realizada a correção geométrica, isto é, retificada a localização das imagens, de acordo com o sistema geodésico de referência. Foram obtidas imagens, previamente retificadas, através do site do INPE e Landsat.org, e feita a correção, manualmente, de cada imagem e iniciado o processamento dos dados.

Foi realizada a calibração radiométrica (Equação 1), processo de transformação do número digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral, assumindo a relação proposta por Markham & Baker (1987 *apud* Silva, 2008).

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad \text{Eq.(1)}$$

onde: a e b são os valores de radiâncias espectrais mínima e máxima, ND é o valor do pixel em número digital, e i corresponde às bandas do satélite.

Com a equação proposta por Bastiaanssen (1995) foi obtida a reflectância, que é a razão entre o fluxo emergente da atmosfera e o fluxo incidente no seu topo, na região e banda espectral analisada (Equação 2).

$$r_{\rho i} = \frac{L\lambda i\pi}{K\lambda \cdot \cos Z \cdot dr} \quad \text{Eq.(2)}$$

onde: $L\lambda i$ é a radiância espectral de cada banda, $K\lambda$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar e dr é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r), em dado dia do ano (Lira, 2010).

Índices de vegetação

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo o índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Jensen, 2009).

O sucesso de suas aplicações se fundamenta no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define o desenvolvimento dessa comunidade (Fontana et al., 1998).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1974) (Equação 3), é calculado pela diferença de reflectância entre a faixa de NIR (infravermelho próximo) e a de VIS, dividida pela soma das faixas NIR e VIS:

$$\text{NDVI} = \frac{(r_{p4} - r_{p3})}{(r_{p4} + r_{p3})} \quad \text{Eq.(3)}$$

onde: r_p é o valor de reflectância referente a cada banda, sendo o algarismo que acompanha a variável, o número que representa a banda (Tucker, 1979).

O SAVI, proposto por Huete (1988) (Equação 4), introduz um fator no NDVI para incorporar o efeito da presença do solo, onde L é um valor constante, o qual, neste estudo, foi assumido como 0,5.

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L)(r_{p4} - r_{p3})}{(L + r_{p4} - r_{p3})} \quad \text{Eq.(4)}$$

onde: r_p é o valor de reflectância referente a cada banda, sendo o algarismo que acompanha a variável, o número que representa a banda. L é o fator de ajuste do solo, considerado como 0,5, nesse estudo.

O Índice de Área Foliar (IAF) é um parâmetro biofísico definido como o total de área foliar por área de superfície do terreno, a expressão empírica do IAF foi proposta por Allen et al. (2002) (Equação 5):

$$\text{IAF} = -\frac{\text{Ln}\left(\frac{0,69 - \text{SAVI}}{0,59}\right)}{0,91} \quad \text{Eq.(5)}$$

onde: Ln é o logaritmo Neperiano.

O EVI, em português, Índice de Vegetação Realçado, apresenta fatores de correção para o solo, atmosfera e densa biomassa. Segundo Jensen (2009), o EVI é um NDVI modificado. Esse índice possui um fator de ajuste para solos (L), só que, neste caso, foi admitido como 1,0.

Este índice contém dois coeficientes (C1 e C2), os quais formam, empiricamente determinados, os valores de 6,0 e 7,5, respectivamente. Finalmente, o fator G foi aplicado para melhorar a sensibilidade para alta biomassa, em função dos efeitos causados pelo substrato abaixo do dossel, além da redução dos efeitos atmosféricos (Equação 6).

$$\text{EVI} = G \frac{r_{p4} - r_{p3}}{r_{p4} + C_1 \times r_{p3} - C_2 \times r_{p1} + L} (1+L) \quad \text{Eq.(6)}$$

Para a elaboração do SARVI foi necessário integrar o fator L (0,5) e a normalização da banda azul, representada na Equação 7. Assim, o índice corrigiu os ruídos derivados do solo e da atmosfera (Equação 8).

$$\rho_{rb} = \rho_{red} - \gamma(\rho_{blue} - \rho_{red}) \quad \text{Eq.(7)}$$

onde: red é banda 3; ρ_3 , Blue é banda; ρ_1 , γ corresponde ao valor 1,0 – utilizado para a redução dos efeitos atmosféricos:

$$\text{SARVI} = \frac{r_{p4} - r_{p3} \rho_{p1}}{r_{p4} + r_{p3} \rho_{p1} + L} \quad \text{Eq.(8)}$$

O AFRI foi desenvolvido com base em relações lineares empíricas, as quais podem associar os produtos gerados através de cálculos com as bandas 7 e 5 com os valores de comprimento de onda encontrados nas bandas do visível. Por exemplo, $0,66 \times \rho_{1,6} \mu\text{m}$ (nível de reflectância no comprimento de onda inserido na banda 5 do Landsat) é igual a $\rho_{0,645} \mu\text{m}$ (nível de reflectância encontrado em tal comprimento de onda na banda 3 do Landsat).

Portanto, o AFRI (Equações 9 e 10) trabalha com os valores de $1,6 \mu\text{m}$ e $2,1 \mu\text{m}$, que, no Landsat 5, estão compreendidos nas bandas 5 e 7, respectivamente em cada formulação, dividindo-se, então, em dois AFRI. O AFRI tem como proposta a resistência aos efeitos atmosféricos, aos gases urbanos e às partículas em suspensão, tais como fumaça, encontradas na atmosfera.

A utilização de valores de comprimento de ondas mais elevados se dá pelo fato que estes têm a capacidade de atravessar as barreiras atmosféricas constituídas por tais matérias.

$$AFRI1 = \frac{(r_{p4} - 0,66r_{p5})}{(r_{p4} + 0,66r_{p5})} \quad \text{Eq.(9)}$$

$$AFRI2 = \frac{(r_{p4} - 0,5r_{p7})}{(r_{p4} + 0,5r_{p7})} \quad \text{Eq.(10)}$$

onde: 0,66 e 0,5 são valores agregados às bandas 5 e 7 para corresponderem às bandas azul e vermelha.

Correlação de Pearson

Para comparar os resultados dos índices, visando validar as suas aplicações, foram realizadas análises estatísticas. Uma dessas análises baseou-se na Correlação de Pearson, a qual efetuou correlações entre os índices de vegetação.

Para tanto, no ERDAS, foi feito um recorte representativo (AOI) em cada raster resultante dos índices de vegetação obtidos em cada cena.

Posteriormente, os valores dos dados matriciais *per pixel*, de todos os IVs, foram exportados para uma planilha eletrônica no Excel, onde foram organizados, automaticamente, por coordenadas.

Em seguida, esses valores foram transferidos para o *software* estatístico IBM® SPSS Statistics®, onde foram feitas as correlações de Pearson e calculada a média dos valores dos índices.

Correção atmosférica

A correção atmosférica foi realizada através do método *Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration* (METRIC), para os índices SARVI, AFRI 1 e 2, com o intuito de avaliar a relação desses com os demais índices, constatando se houve ou não melhoras em seus resultados.

A correção atmosférica pelo método METRIC tem como finalidade, através de uma série de cálculos, fazer com que a reflectância per pixel assuma valores como se cada pixel estivesse no topo da atmosfera, diante do sensor, ou se como a atmosfera fosse retirada. Esse método vale para todas as bandas e é expresso pela Equação 11, a seguir.

$$\rho_{sup,b} = \frac{(\rho_{\lambda,b} - \rho_{atm,b})}{(\tau_{inc,b} \times \tau_{asc,b})} \quad \text{Eq.(11)}$$

onde: $\rho_{\lambda,b}$ é a refletividade planetária; $\rho_{atm,b}$ é a refletância atmosférica, obtida por meio da Equação 2; $\tau_{inc,b}$ é a transmissividade atmosférica relativa à radiação solar incidente na superfície e $\tau_{asc,b}$ é a transmissividade relativa à radiação refletida pela superfície, obtidos para cada banda b (1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM - Landsat 5), individualmente (Silva et al., 2008).

Contudo, para que se torne possível efetuar a correção atmosférica, se faz necessário implementar os cálculos com dados referentes à área em que foi registrada a cena. Esses dados consistem em data, temperatura atmosférica no momento em que foi feito o registro da imagem, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, e, o valor de elevação do sol.

Mapeamento e layout

Os mapas de localização, espacialização e dos IVs foram construídos no *software* de geoprocessamento ArcGIS 9.3, com licença adquirida pelo SERGEO. A classificação foi supervisionada. A princípio, a cena com o realce foi dividida em 32 classes automáticas. Posteriormente foi utilizado um esquema degradê de cores, onde cada tom vinculou-se a um valor.

Assim, visando resumir em cinco classes, foi utilizada uma cena com a reflectância e eliminados os pontos correspondentes ao mesmo alvo. A partir do momento em que o alvo mudou, os valores eliminados tornaram-se uma classe e, assim, sucessivamente.

Resultados

Ao considerar que o AFRI 1 e 2 e o SARVI propõem resistência aos efeitos atmosféricos, resolveu-se adotar o município de

São Paulo nesse estudo, em razão das suas propriedades atmosféricas, com alta concentração de gases urbanos, partículas na atmosfera e diversos tipos de poluentes, e com um agravante:

uma nuvem, aparentemente da classe Stratus, sobre a cidade, no momento em que o sensor fez o registro da cena (Figura 2).

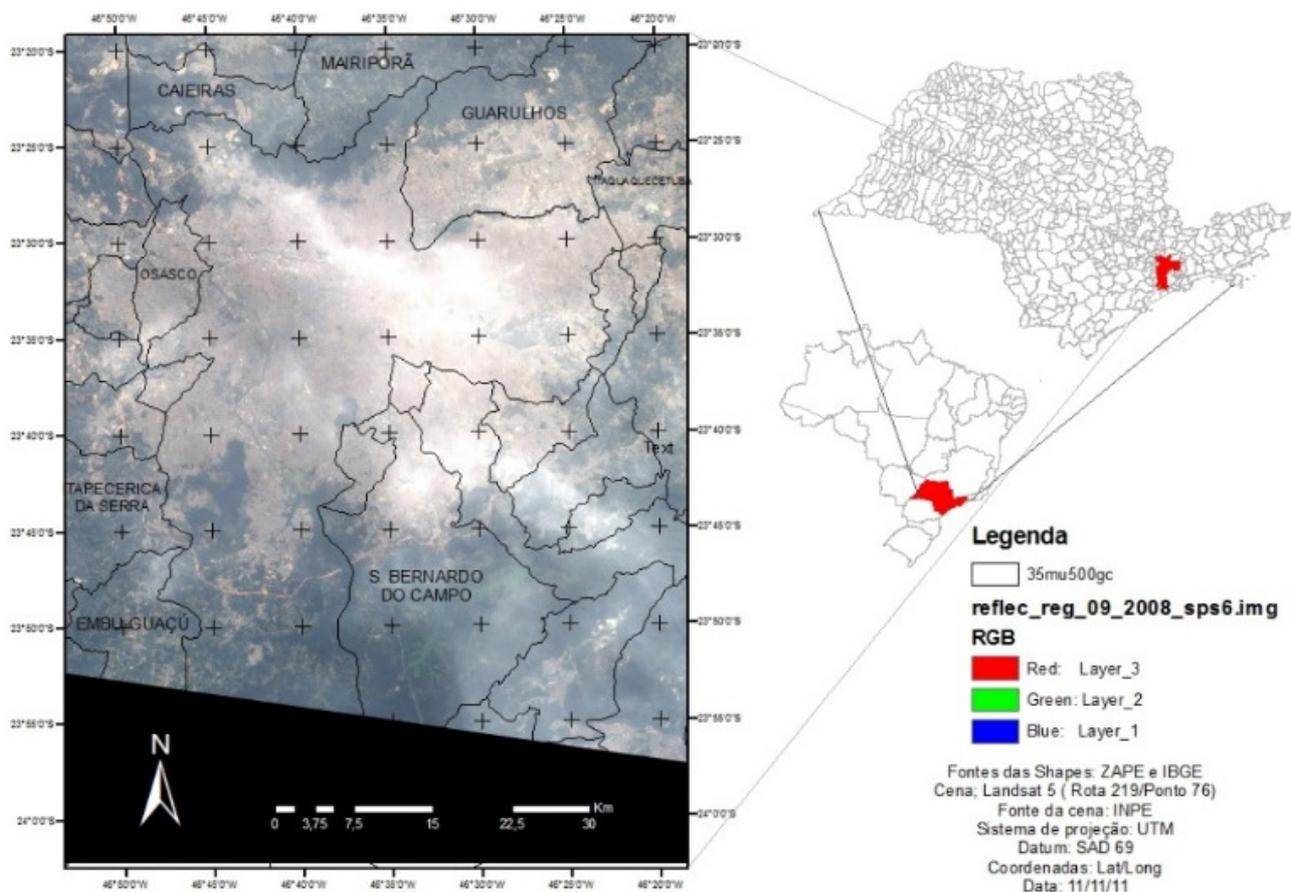


Figura 2. Cena utilizada no estudo, correspondente ao município de São Paulo-SP.

Posteriormente, foram estimados os índices de vegetação aplicados à mesma imagem do município de São Paulo. As reservas de Mata Atlântica no município são poucas e encontram-se bastante degradadas, em virtude da influência antrópica no bioma, refletindo-se no modo de reprodução do espaço. Dessa forma, podemos perceber, através dos valores dos índices de vegetação investigados, que as reservas florestais no município apresentam valores mais elevados, enquanto as áreas com menor cobertura de vegetação apresentam valores mais baixos.

A Figura 3 apresenta a representação dos vários índices de vegetação aplicados neste estudo. O IAF apresentou valores próximos a 1,22 nas áreas com presença de vegetação na cidade, o NDVI ficou em torno de 0,999, o EVI máximo ficou em torno de 0,599, o SAVI máximo apresentou valores de 0,495, e os índices propostos neste estudo, como o SARVI, apresentou valores de 0,60, o AFRI 1 apresentou

valores de 0,727 e o AFRI 2 apresentou valores máximos de 0,993 (Figura 3).

A média do IAF foi baixa por conta da reduzida estrutura da vegetação, por ser este um índice que está correlacionado ao conteúdo de biomassa presente na área. O NDVI médio, que está relacionado ao conteúdo de clorofila na vegetação, ficou em torno de 0,22. O EVI e o SAVI tiveram uma média de 0,12. O SARVI apresentou um valor baixo em sua média em relação aos outros índices, expressando uma existência sem significância de vegetação na área considerada, diferente dos outros IVs e os AFRIs tiveram uma média alta, com o AFRI1 obtendo uma média de 0,34 e o AFRI2 com uma média de 0,53. A Tabela 3 apresenta a média dos valores de cada pixel para cada índice, o desvio padrão e o número de pixels utilizados nos cálculos estatísticos.

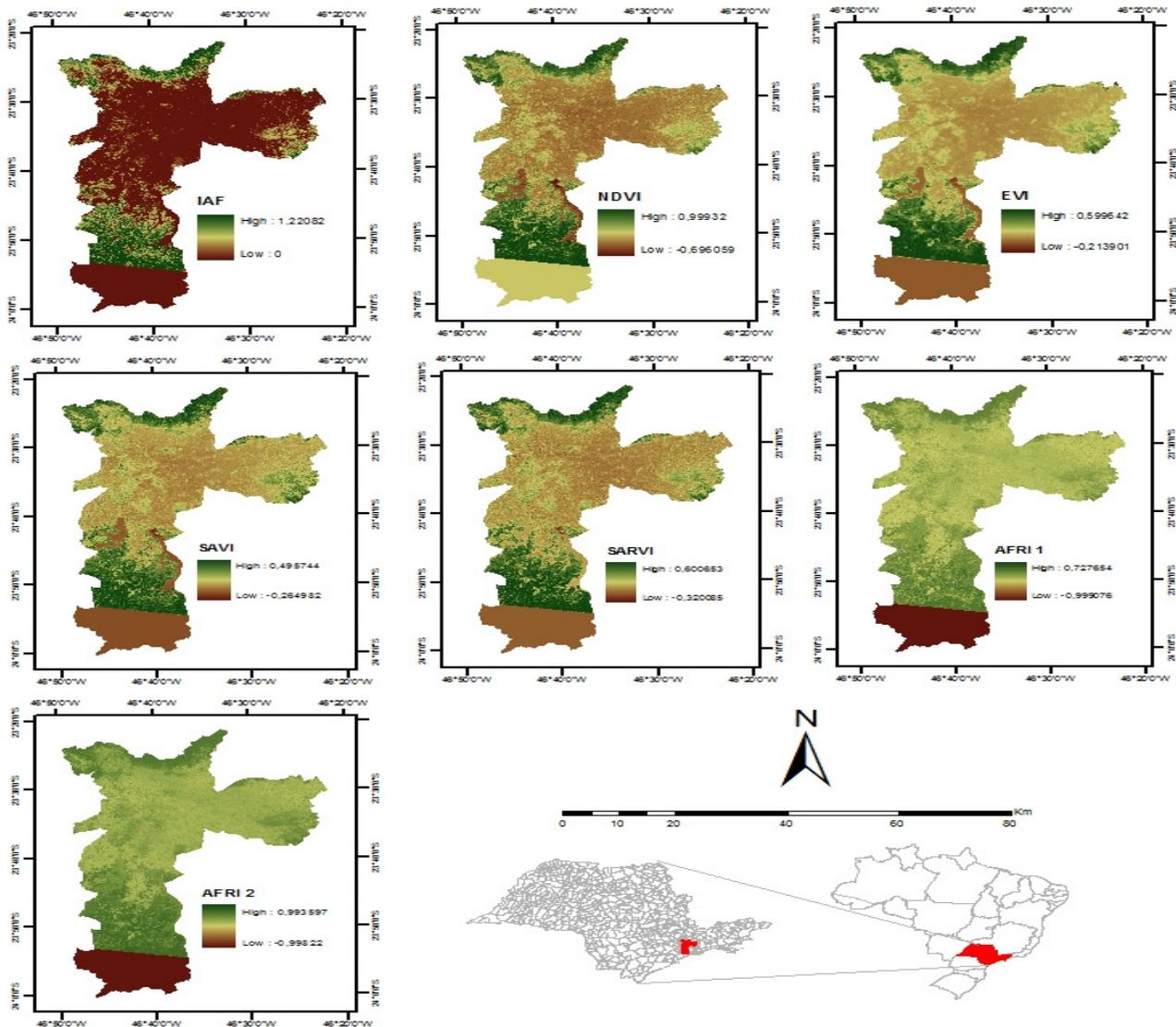


Figura 3. Índices de vegetação aplicados em São Paulo-SP.

Tabela 3. Estatística descritiva relativa aos índices de vegetação (IV) aplicados ao município de São Paulo (Santana et al., 2017). IAF = Índice de Área Foliar, NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, EVI = Índice de Vegetação Realçada, SAVI = Índice de Vegetação ajustada ao Solo, SARVI = Índice com Correlação Atmosférica, AFRI1 = Índice de Vegetação Livre de Aerossóis e AFRI2 = Índice de Vegetação Livre de Aerossóis.

IV	Média	Nº de pixel
IAF	0,07	7564,00
NDVI	0,22	7564,00
EVI	0,12	7564,00
SAVI	0,12	7564,00
SARVI	0,09	7564,00
AFRI1	0,34	7564,00
AFRI2	0,53	7564,00

Quando submetidos à correlação de Pearson, os índices, de maneira geral, apresentam alta relação entre si (Tabela 4). Entretanto, todos os IVs apresentam menor ligação com o IAF. O AFRI 1, como previsto, foi o índice que apresentou menor afinidade com os demais. Por outro lado, o AFRI 2, na análise estatística, chama atenção ao correlacionar-se bem com os outros índices de vegetação, contrariando o que mostra a sua representação espacial. Sendo assim, pode-se afirmar que, tanto o SARVI quanto ao AFRI 2, não se destacaram positivamente frente aos outros índices, como foi proposto. O AFRI 1 apresentou fraco desempenho em função do que foi proposto (Tabela 4).

Tabela 4. Correlação de Pearson aplicada aos índices de vegetação (IV) para São Paulo-SP.

IV	IAF	NDVI	EVI	SAVI	SARVI	AFRI1	AFRI2
IAF	1	0,948	0,972	0,963	0,942	0,841	0,874
NDVI	0,948	1	0,990	0,985	0,990	0,881	0,935
EVI	0,972	0,990	1	0,998	0,978	0,867	0,917
SAVI	0,963	0,985	0,998	1	0,974	0,861	0,913
SARVI	0,942	0,990	0,978	0,974	1	0,884	0,933
AFRI1	0,841	0,881	0,867	0,861	0,884	1	0,962
AFRI2	0,874	0,935	0,917	0,913	0,933	0,962	1

Discussão

Estudos voltados para a espacialização e a quantificação de florestas urbanas são desafiadores, por tratar feições bastante heterogêneas e sob influência de um conjunto de variáveis ambientais, que têm potencial para interferir nas análises; essas dificuldades foram apontadas em estudos como os de Oliveira (2010) e Biondi (2015).

Por essa razão, os índices de vegetação avaliados neste estudo podem traçar uma diretriz quanto a determinados comportamentos da vegetação, em face do adensamento urbano existente na cidade de São Paulo. Estudos recentes, realizados por Silva et al. (2015a) e Grise et al. (2016), apontam os desafios da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em áreas urbanas.

O NDVI identificou, adequadamente, as áreas com conteúdo de clorofila, o que revela muitas áreas com presença de vegetação, entretanto índices como o SAVI demonstraram a presença de áreas degradadas nas áreas de Mata Atlântica, visto que esse índice responde bem a áreas com solo exposto, o que demonstra o potencial para estudos de áreas degradadas e fragmentadas dentro das reservas de Mata Atlântica na área estudada. Esse tipo de resposta é esperada para este índice, como apontado nos estudos de Fernandes (2016), no sudeste, e Ribeiro (2016), no nordeste brasileiro.

Quanto ao IAF, tomando como referência sua média, a área considerada apresenta pouquíssima vegetação; isso ocorre porque este é um índice que está correlacionado ao conteúdo de biomassa presente na área, dessa forma, nem sempre um NDVI alto está ligado ao conteúdo de biomassa presente na área (Silva, 2015b).

Vale ressaltar, porém, que boa parte da cidade tinha uma cobertura de nuvem, o que muito provavelmente atrapalhou a captação da reflectância da vegetação pelo sensor, interferindo nos resultados do cálculo do IAF. O SARVI apresenta um valor baixo em sua média em relação aos outros índices, expressando uma existência sem significância de vegetação na área considerada, diferente dos outros IVs.

O IAF no município de São Paulo apresentou-se diferente dos demais índices, principalmente na área urbana, enquanto que nas áreas com vegetação mais significativas mostra certa afinidade com os demais. Porém, como a quantificação dos valores do IAF diferenciam-se dos demais índices, podendo ser maior que 3,0, a representação no *software* se diferencia.

Ainda assim, enquanto outros índices, como o EVI, apresentam tonalidades que representam valores condizentes com a presença de vegetação, o IAF considera como área sem presença vegetal. O AFRI se comportou bastante diferente dos demais índices, apresentando feições de vegetação no que seria área urbana, além do fato de estes índices confundirem corpos hídricos com vegetação, novamente. Isso reforça a ideia de que esses IVs não apresentam bons resultados, quanto aos demais, o que pode ser constatado na análise estatística. O SARVI, demonstra aproximação com os outros índices.

Os índices de maneira geral apresentaram alta correlação entre si. Entretanto, todos os IVs apresentam menor ligação com o IAF. O AFRI 1, como previsto, foi o índice que apresentou menos afinidade com os outros. Por outro lado, o AFRI 2, na análise estatística, chama atenção ao correlacionar-se bem com os outros índices de vegetação, contrariando o que mostra a sua representação espacial.

Sendo assim, pode-se afirmar que, tanto o SARVI quanto ao AFRI 2, em São Paulo, apresentaram maior correlação com os demais IVs.

Conclusão

Os índices de vegetação se mostraram como ferramenta fundamental de apoio aos estudos ambientais e geográficos, por identificar o nível de degradação e fragmentação que este bioma apresenta no município de São Paulo. Índices, como o NDVI e o SAVI, se mostraram satisfatórios quanto ao levantamento das áreas vegetadas e áreas em processo de degradação, respectivamente.

A análise integrada dos índices de vegetação, incluindo os cálculos estatísticos,

mostrou-se fundamental para a verificação do desempenho dos IVs e suas aplicabilidades em diferentes áreas. Assim, o estudo reforça o argumento de que a interação dos índices de vegetação é importante para legitimar o desempenho individual, e tornar mais rica uma investigação que utilize os IVs.

O AFRI, proposto nesse estudo como alternativa de análise de vegetação em áreas urbanas, não mostrou boa correlação com os demais índices, porém em São Paulo, o AFRI 2 apresentou maior correlação com os demais IVs, aproximando-se de sua proposta, em função das condições atmosféricas da cidade, apontando que, para a identificação de fragmentos florestais em áreas urbanas, este índice pode ser levado em consideração para a espacialização e a análise dos componentes fisiológicos da vegetação.

Dessa forma, o estudo foi válido por identificar os índices de vegetação que responderam melhor na área, bem como apontar os desafios para melhorar os índices que não responderam tão bem, como o AFRI1. Isso servirá, no futuro, para a elaboração de estratégias de monitoramento e preservação ambiental na cidade de São Paulo.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pelo apoio à produção científica, visto que financiou o estudo. Ao SERGEO, pela liberação no uso das licenças dos *softwares* utilizados. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela disponibilização gratuita da imagem utilizada no estudo.

Referências

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TEREZZA, R. 2002. Sebal (Surface Energy Balance Algorithms for Land), Advanced Training and User Manual, Idaho Implementation, version 1.0.

BASTIAANSEN, W. G. M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273p.

BIONDI, D. 2015. Floresta urbana. In: BIONDI, D. Floresta urbana. Curitiba.

FERNANDES, A. C. G.; COUTINHO, M.A. N.; SANTOS, V. G.; NASCIMENTO, C. R. 2016. Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas. Cad. Ciênc. Agrá., v. 8, n. 2, p. 30-40.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, A. 1988. Relação entre índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, n. 8, p. 1399-1405.

GRISE, M. M.; BIONDI, D.; ARAKI, H. 2016. A Floresta Urbana da Cidade de Curitiba-PR. Revista Floresta, v. 46, n. 4, p. 425-438.

HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, n. 25, p. 295-309.

JENSEN, J. R. 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução José Carlos Neves Epiphany (Coord.). São José Dos Campos: Parêntese.

LIRA, D. R.; ARAUJO, M. S. B.; SA, E. V.; SILVA, H. A. 2010. Mapeamento e Quantificação da Cobertura Vegetal do Agreste Central de Pernambuco Utilizando o NDVI. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, p. 157-162.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures, EOSAT Landsat Tech. Note, pp. 3-8.

OLIVEIRA, A. C. R. DE; CARVALHO, S. M. 2010. Arborização de vias públicas e aspectos socioeconômicos de três vilas de Ponta Grossa-PR. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, v. 5, n. 3, p. 42-58.

PONZONI, F. J. 2002. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica. In: RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EPIPHANIO, J. C. N.; MOREIRA, M. A.; KAMPEL, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. de; MARTINI, P. R.; FERREIRA, S. H.; TAVARES JÚNIOR, S. S.; SANTOS, V. M. N. dos (Ed.). Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE. p. 27. Cap. 8. (INPE-8984-PUD/62). Disponível em:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.1>. PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. 2007. Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 144p.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. 1973. Monitoring vegetation

systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, D. C. Proceedings. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, v. 1, p. 309-317.

SILVA, B. B.; MENDONÇA, R. R. O.; SILVA, S. T. A.; FERREIRA, R. da C. 2008. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do Estado da Ceará com imagens TM - Landsat 5. Revista de Geografia, v. 25, p. 33-52.

SILVA, E. R. A. C.; MELO, J. G.; GALVÍNCIO, J. D. 2011. Identificação das Áreas Susceptíveis a Processos de Desertificação no Médio Trecho da Bacia do Ipojuca-PE através do Mapeamento do Estresse Hídrico da Vegetação e da Estimativa do Índice de Aridez. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4, n. 3, p. 629-649.

SILVA, E. R. A. C.; GALVÍNCIO, J. D.; BRANDÃO NETO, J. L.; MORAIS, Y. C. B. 2015a. Space-Time Analysis of Environmental Changes and your Reflection on the Development

of Phenological of Vegetation of Mangrove. Journal of Agriculture and Environmental Sciences, v. 4, n. 1, p. 245-253.

SILVA, E. R. A. C.; MORAIS, Y. C. B.; SILVA J. F DA; GALVÍNCIO, J. D. 2015b. Water consumption irrigation for banana farming in edaphoclimatic conditions of the stream of Pontal basin in Semiarid of Pernambuco. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, p. 921-937.

SILVA J. F.; SILVA, E. R. A. C.; FERREIRA, P. dos S.; GOMES, V. P.; BARBOZA, K. M. do N.; CANDEIAS A. L. B. 2016. Spatial-temporal evolution analysis of the vegetation in the Chapadinha microregion (Maranhão, Brazil) through remote sensing. Journal of Hyperspectral Remote Sensing, v. 6, n. 6. p. 329-337.

TUCKER, C. J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, n. 8, p. 127-150.