

COMBINAÇÃO DE DADOS LIDAR E IMAGENS MULTIESPECTRAIS NA SEPARAÇÃO DA MÉDIA E ALTA COBERTURA VEGETAL EM AMBIENTE URBANO

César Francisco de Paula¹; Luis Antonio de Lima²; Jorge Pimentel Cintra³; Henrique Cândido de Oliveira⁴, Diógenes Cortijo Costa⁵

Resumo – A identificação da cobertura vegetal presente nas cidades é de grande relevância para o planejamento urbano e ambiental, uma vez que esta informação combinada com outros conjuntos de dados possibilita estabelecer correlações entre índices de vegetação, medição do índice de carbono e variação da temperatura através da formação de ilhas de calor. Diversas são as técnicas empregadas para extrair esta informação, dentre as quais merece destaque a utilização do sensoriamento remoto e do geoprocessamento. A precisão e acurácia da extração da informação estão diretamente relacionadas com as tecnologias utilizadas, sendo que dados com maiores resoluções tem-se melhores resultados. Neste trabalho a combinação de dados LiDAR (*Light Detection and Range*) e imagens multiespectrais obtidas através de câmeras digital aerofotogramétrica, geraram bons resultados na identificação da vegetação média e alta com erros inferiores a 7,7% na composição dos polígonos (confusão durante a extração automática) e 11,7% na avaliação em áreas mensuradas (m²) para polígonos gerados automaticamente quando comparados com métodos tradicionais (restituição estereoscópica), tidos como padrão de comparação. A validação deste método também foi dada pela boa adaptação, evidenciadas para áreas de vegetações isoladas ou individualizadas, quando se comparam os polígonos gerados pelas duas metodologias.

Abstract – The identification of vegetation cover inserted in the urban environment has great relevance for urban and environmental planning, since this information combined with other data sets makes it possible to establish correlations between vegetation indices, carbon index measurement and temperature variation through the formation of heat islands. There are several techniques used to obtain this information, among which the use of remote sensing and geoprocessing deserves to be highlighted. The precision and accuracy of information extraction are directly related to the technology used, and data with high resolutions provide better results. In this work, the combination of LiDAR (*Light Detection and Range*) data and multispectral images obtained through aerophotogrammetric digital cameras, could generate results with errors of less than 7,7% in the polygon composition (confusion during automatic extraction) and 11,7% in the evaluation of the measured areas (m²) for automatically generated polygons when compared with traditional methods (stereoscopic restitution). The validation of this method was also given by the good adaptation, evidenced for areas of isolated or individual vegetation, when comparing the polygons generated by both methodologies.

Palavras-Chave – Nuvem de pontos LiDAR; Índice de Vegetação; NDVI; Mapa de Vegetação.

¹ Eng. Cartógrafo, MSc, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, (11) 3091-5208, cesardepaula@usp.br

² Eng. Civil, MSc., Universidade de Campinas – UNICAMP, (19) 3521-2338, luis@fototerra.com.br

³ Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, (11) 3091-5208, jpcintra@usp.br

⁴ Professor Doutor, Universidade de Campinas – UNICAMP, (19) 3521-2338, hcandido@unicamp.br

⁵ Professor Doutor, Universidade de Campinas – UNICAMP, (19) 3521-2338, dcortijo@unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da cobertura vegetal presente no ambiente urbano é de suma importância para o urbanismo e meio ambiente pois, além de ajudar no planejamento e estabelecimento de novas políticas, é também uma poderosa ferramenta utilizada em estudos sobre a variação da temperatura e a formação de ilhas de calor (KARL et al., 1988 e CHANGNON, 1992).

Diversas são as metodologias empregadas na avaliação da vegetação presente nas cidades. Dentre as mais utilizadas estão as técnicas de geoprocessamento aplicadas a conjuntos de dados oriundos de sensores remotos. A evolução tecnológica trouxe sensores remotos modernos capazes de coletar informações com alta resolução e em um curto espaço de tempo, atrelado a este fator surgiram novas técnicas que possibilitam obter resultados rápidos precisos e acurados. Gallo et al., (1993) utilizaram o resultado do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calculado sobre cenas adquiridas pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) combinado com informações de temperatura coletadas por estações localizadas na região de estudo com o objetivo de avaliar os efeitos das ilhas de calor no ambiente urbano da cidade de Seattle, Estado Unidos. Dentre as conclusões apresentadas os autores observaram que na área urbana existem altas temperaturas e baixos índices de vegetação, sendo o oposto do que acontece nas localidades rurais.

Fung e Siu, (2000) utilizaram os valores de NDVI de uma série temporal (1987, 1991, 1993 e 1995) calculados utilizando imagens SPOT HRV (GSD de 20 m) para avaliar a qualidade das mudanças ambientais na cidade de Hong Kong. Por meio dos valores obtidos nos NDVI's os autores puderam concluir em seu trabalho que as técnicas de sensoriamento remoto são poderosas ferramentas para o acompanhamento evolutivo e ambiental em área urbanas. O resultado obtido na série temporal do NDVI, combinados com outros conjuntos de informações, foram capazes de apresentar a dinâmica ocorrida com a vegetação ao longo do tempo e ajudou a identificar as áreas desprovidas de cobertura vegetal e que demandam maior atenção.

Preocupados com um mapeamento preciso e atualizado da vegetação no ambiente urbano, Parmehr, Amati e Fraser, (2016) apresentaram uma metodologia para identificação da cobertura vegetal no distrito de Williamstown, utilizando imagens do satélite *WorldView 2* (GSD de 0.50 m) combinadas com a nuvem de pontos LiDAR com densidade média de 2 pts/m². Neste trabalho a fusão realizada entre o NDVI calculado com a nuvem de pontos LiDAR trouxe uma melhora na acurácia da classificação da vegetação, quando comparada com a classificação realizada apenas com a nuvem de pontos LiDAR.

Uma metodologia similar ao apresentado por Parmehr, Amati e Fraser, (2016) foi proposta por Dogon-yaro et al., (2016). Os autores aplicaram sua metodologia para um conjunto de dados de sensoriamento remoto coletados para um distrito de Istambul (Turquia), no qual foi feita a fusão com a nuvem de pontos LiDAR do NDVI e SI (*Shadow Index*), ambos calculados utilizando imagens RGB (GSD de 0.10 m) e Nir (GSD 0.50 m). Como resultado de seu trabalho os autores puderam identificar os pontos da nuvem que se referem à cobertura vegetal. É importante dizer que o SI trouxe maior precisão na extração dos pontos de vegetação uma vez que a presença de sombras pode trazer confusões no cálculo do NDVI.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia que pode ser empregada para a separação da cobertura vegetal presente no ambiente urbano, utilizando dados LiDAR com alta densidade (16 pts/m²) e imagens multiespectrais de alta resolução, sendo possível obter produtos geoespaciais proporcionando um delineamento automático e preciso para a cobertura vegetal. No que se refere à metodologia proposta, além do cálculo do NDVI realizado para cada ponto individualizado da nuvem, merece destaque a separação entre média e alta vegetação utilizando o Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSn) combinado com o índice de rugosidade de superfície.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área de estudo está localizada na cidade de Campinas, estado de São Paulo. Ela compreende um retângulo com área aproximada de 6,75 km², sendo 2,5 km no sentido Leste-Oeste e 2,7 km no sentido Norte-Sul.

Na porção central da área está o Campus da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Sua faixa lateral esquerda (porção oeste) contém o bairro residencial de Barão Geraldo, com uma malha viária bem definida. Já as porções à direita e na parte inferior da área possuem características rurais, sem a presença de grandes construções, exceção feita ao pequeno trecho de aproximadamente 0,16 km² no canto inferior direito, no qual está inserido o bairro Parque dos Jacarandás.

O relevo apresenta variação moderada, sendo sua menor altitude aproximadamente 585 metros, próximo a porção superior da área, e sua maior altitude aproximadamente 687 metros, já na parte inferior direita da área.

A Unicamp pode ser definida como um ambiente urbano regular contendo edificações com diversas alturas, tamanhos e disposição, e por uma cobertura vegetal diversificada entre as espécies sendo encontradas desde vegetação rasteira (gramíneas e arbustos) até árvores com altura acima de 30 m. Outros objetos se fazem presentes na área de estudo tais como: linhas de transmissão de energia, corpos d'água, veículos e estufas (coberturas de vidro transparente).

No que se refere a densa cobertura vegetal, pode-se, pelo ortomosaico da Figura 1, verificar a ocorrência de algumas clareiras, vendo-se o solo exposto. Também se pode observar que a cobertura vegetal se sobrepõe às edificações gerando área de oclusões para estes objetos.



Figura 1. Esquema gráfico da localização da área de estudo - UNICAMP.

3. CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS

3.1. Nuvem de Pontos LiDAR

Os dados LiDAR utilizados neste trabalho foram coletados em dezembro de 2012 utilizando o sensor LiDAR Harrier 68i marca Trimble. A configuração estabelecida para o sensor gerou uma nuvem de pontos LiDAR discreta (sem informação *Full Waveform*) georreferenciada e com uma densidade média de 16 pts/m². Durante a execução do voo, utilizou-se uma estação GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em solo, localizada no interior da área da Unicamp que realizou o rastreamento das informações oriundas da constelação GNSS simultaneamente com o receptor GNSS instalado na aeronave. As informações de rastreamento GNSS juntamente com as informações de atitude da aeronave, registradas pelo sistema inercial (IMU), foram combinadas e seu resultado foi utilizado no georreferenciamento direto da nuvem de pontos. O georreferenciamento direto, convém lembrar por facilidade de entendimento, consiste em um procedimento computacional que transforma as coordenadas do sistema de escaneamento em coordenadas vinculadas a um sistema de referência, utilizando um modelo matemático capaz de

integrar as informações referentes a trajetória de voo, parâmetros de montagem dos equipamentos e outras informações (MANDLBURGER et al., 2009).

Por meio da nuvem de pontos LiDAR foram gerados outros produtos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Um deles é o Modelo Digital de Superfície (MDS) que consiste em um arquivo *raster* gerado pela interpolação da altimetria dos primeiros ecos (retornos) emitidos pelo sensor laser produzindo uma representação altimétrica de todos os objetos antrópicos (vegetação, carros, edificação, postes, linhas de transmissão de energia etc) contidos na área de interesse. Outro foi o Modelo Digital de Terreno (MDT), também gerado pela interpolação da altimetria de cada ponto da nuvem filtrada, mas utilizando apenas os pontos incidentes no terreno e classificados como chão (*ground*). Estes dois produtos foram utilizados para obter o Modelo Digital de Superfície Normalizada (MDSn) que consiste na diferença algébrica ponto a ponto.

3.2. Imagens Multiespectrais de alta resolução espacial

O imageamento multiespectral para a área da Unicamp foi realizado em novembro de 2012 utilizando uma câmera digital modelo DMC I (*Digital Mapping Camera*) de marca *Z/I Imaging*. As oito câmeras que integram este sensor (04 *panchromatics*, 01 *red*, 01 *green*, 01 *blue* e 01 *infrared*) coletam informações da superfície terrestre sendo possível compor imagens multiespectrais (*red*, *green*, *blue* e *near-infrared*) de alta resolução espacial, trazendo grande detalhamento na representação e identificação dos objetos na área de estudo. Com a configuração empregada para este sensor durante a coleta das informações foi possível gerar um ortomosaico multiespectral (R, G, N, Nir) com resolução radiométrica de 8 bits e *Ground Sample Distance* (GSD) de 0.10 m.

Um ortomosaico pode ser definido como uma fotografia que traz a representação dos objetos em suas posições ortogonais ou corrigidas, sendo equivalente aos mapas planimétricos que também mostram a posição geográfica verdadeira dos elementos representados. Assim, ele pode ser utilizado para realizar medidas de distância, área e ângulos (WOLF, DEWITT, 2000). Como foi gerado um ortomosaico multiespectral além de apresentar a posição geográfica verdadeira também traz informações espectrais refletidas pelos objetos na superfície da Terra, sendo possível combinar mensurações com técnicas de processamento digital de imagem em análises detalhadas e precisas.

4. METODOLOGIA

A metodologia empregada na separação da vegetação em ambiente urbano é apresentada por meio do fluxograma representado na Figura 02.

É importante dizer que antes de iniciar o desenvolvimento metodológico, foi realizada uma análise da compatibilidade geométrica entre os dados de insumo. Nesta análise foram verificadas o posicionamento dos objetos presentes no ortomosaico e nos dados LiDAR, de modo a avaliar regiões com deslocamento posicional presentes no ortomosaico, ocasionados pela variação da altura dos objetos (edificações, árvores, postes, etc).

Nesta análise não foram evidenciadas discrepâncias posicionais que viessem a prejudicar a separação da cobertura vegetal. Uma análise quanto a qualidade posicional dos elementos também foi executada, mostrando que os produtos gerados atingiram precisões da ordem de 20 centímetros, tanto para a componente planimétrica quanto para a componente altimétrica.

A fusão das bandas espectrais (*Red* e *Nir*) e do MDSn com a nuvem de pontos LiDAR gerou em cada ponto da nuvem novos atributos contendo informações referente às bandas multiespectrais e altura dos objetos. Utilizando a nuvem de pontos com os novos atributos foram calculados para cada ponto os índices de vegetação (NDVI) e rugosidade (E.R.).

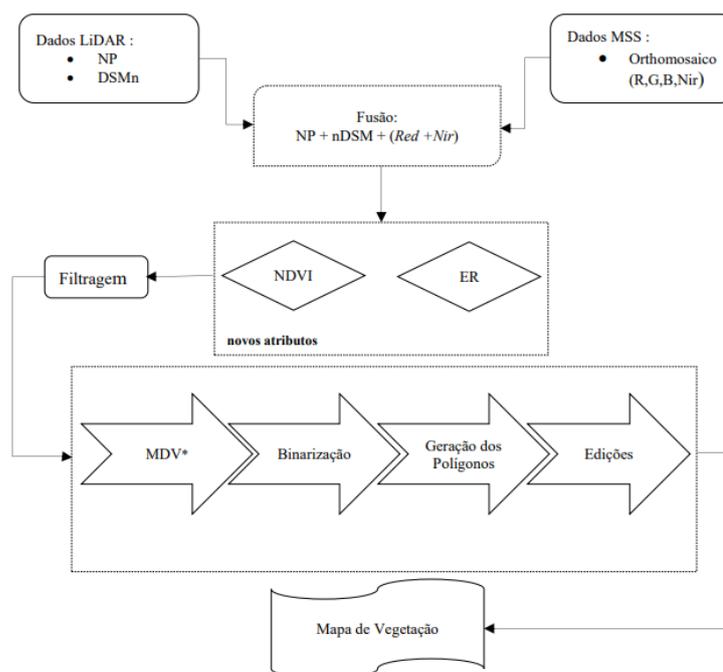


Figura 2. Fluxograma metodológico.

4.1. NDVI

Os índices de vegetação correspondem a informações obtidas por meio da combinação de dados multiespectrais baseando-se na diferença entre absorção, transmitância e energia refletida pela vegetação nas bandas vermelho e infra vermelho próximo (FUNG e SIU, 2000).

Existem diferentes maneiras para se calcular índices de vegetação: *Ratio Vegetation Index* (RVI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Perpendicular Vegetation Index* (PVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (TSAVI) e *Tasseled Cap Greenness Index* (TCGI) (JENSEN, 1996).

Para Fung e Siu (2000) dentre os diversos índices de vegetação existentes, o NDVI é o mais utilizado para identificação de cobertura vegetal na superfície terrestre, quando da utilização de dados de sensoriamento remoto, e foi o que utilizamos neste trabalho. O NDVI consiste em um índice utilizado para a separação da cobertura vegetal por meio das assinaturas espectrais presentes nas bandas do vermelho e infravermelho próximo. Neste trabalho os valores do NDVI foram calculados individualmente para cada ponto da nuvem pois cada um deles possuía a informação das bandas espectrais na forma de atributo.

4.2. Roughness (Echo Ratio – E.R.)

Para cada ponto da nuvem também foram calculados os valores referentes a transparência e rugosidade utilizando o índice *Echo Ratio* (E.R.). A concepção do parâmetro *point density ratio* foi introduzido por Rutzinger et al., (2007) com o objetivo de distinguir os pontos da nuvem incidentes sobre a cobertura vegetal dos que foram sobre edificações. Höfle et al., (2008) modificaram o modelo de *point density ratio* criando um novo parâmetro chamado *Echo Ratio* (E.R.), que compreende uma medida de rugosidade e transparência local, que é calculada diretamente na nuvem de pontos 3D.

Uma variação na determinação do E.R. pode ser encontrada na literatura. O *Slope-adaptive Echo Ratio* (S.E.R.) foi proposto também por Höfle et al., (2010), tendo como base estudos similares propostos por Filin & Pfeifer, (2006). Como o próprio nome sugere, a determinação do S.E.R., além das buscas de pontos ser realizada no espaço 2D e 3D utiliza também a declividade do ponto através de uma estimativa inicial ajustando um plano por meio da minimização dos resíduos verticais para os pontos encontrados na vizinhança 3D. Se o desvio padrão dos resíduos encontrados não exceder um determinado limiar, tem-se que a região local é plana e suave e o valor do raio de busca determinado no S.E.R. será utilizado como raio de busca no E.R. Para o

caso em que a ponto de busca esteja localizado no interior da vegetação (onde nenhum plano confiável é determinado – resíduos dos desvios padrões excedem o limiar), o valor do raio de busca mantém o estimado no E.R. A Figura 3 apresenta graficamente a definição apresentada para a determinação do *Echo Ratio* – E.R. (a) e *Slope-adaptation Echo Ratio*- S.E.R (b).

Pela Figura 3 (a) nota-se que o E.R. pode assumir diferentes valores dependendo de onde o ponto da nuvem teve sua incidência sobre o objeto. Quando na superfície perfilada não são encontrados agrupamentos de pontos em diferentes níveis no cilindro de busca, tem-se que os valores calculados para o E.R. estão próximos de 100%, sugerindo que estes pontos representam uma superfície “sólida” (telhados e terreno), ou seja, não ocorreu penetração dos pontos durante o perfilamento. Quando a esfera de busca encontra diferentes níveis de pontos dentro do cilindro, os valores calculados para o E.R. estão próximos de 50% indicando uma superfície com rugosidade, ou seja, durante o perfilamento houve concentração de pontos em diferentes níveis, podendo ser denotativo de que o objeto consiste em uma cobertura vegetal.

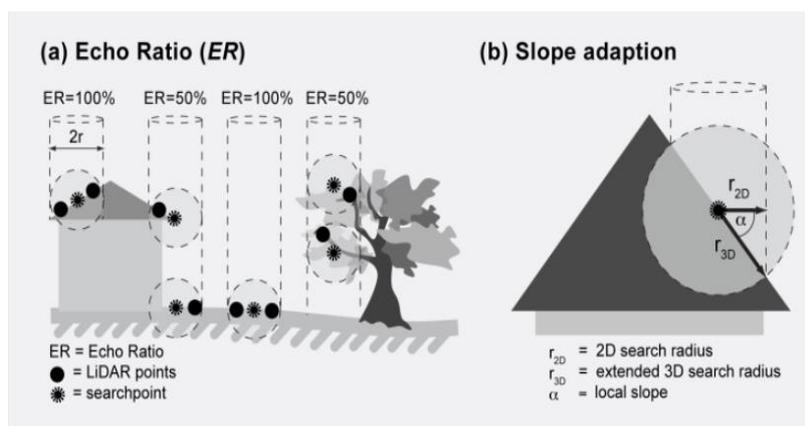


Figura 3. Rugosidade calculada para cada ponto usando *Echo Ratio* (a) e *Slope Adaptation* (b).

Pela Figura 3(a) nota-se que o E.R. pode assumir diferentes valores dependendo de onde o ponto da nuvem incidiu sobre o objeto. Quando na superfície perfilada não são encontrados agrupamentos de pontos em diferentes níveis no cilindro de busca, tem-se que os valores calculados para o E.R. estão próximos de 100%, sugerindo que estes pontos representam uma superfície “sólida” (telhados e terreno), ou seja, não ocorreu penetração dos pontos durante o perfilamento. Quando a esfera de busca encontra diferentes nível de pontos dentro do cilindro, os valores calculados para o E.R. estão próximos de 50% indicando uma superfície com rugosidade, ou seja, durante o perfilamento houve concentração de pontos em diferentes níveis, sugerindo que o objeto seja é uma cobertura vegetal

4.3. Filtragem da Nuvem de Pontos

A separação da cobertura vegetal foi realizada pela combinação de filtros aplicados sobre a nuvem de pontos considerando a altura da vegetação, os valores calculados para o NDVI e o E.R.

A utilização separada de cada uma destas variáveis como filtro da nuvem de pontos não apresentam bons resultados pois em cada uma delas existe alguma limitação. Poderia ser considerada a filtragem da vegetação no ambiente urbano, levando-se em consideração apenas a classificação realizada por algoritmos, tais como o Scop++, porém estes trazem algumas confusões na classificação da nuvem de pontos, sendo comum pontos de vegetação serem atribuídos a outras classes tais como edificações, principalmente quando existe a sobreposição entre estes objetos.

Utilizar as alturas dos objetos na separação da cobertura vegetal não é de total eficiência para o ambiente urbano, uma vez que o resultado traz outros tipos de objetos (edificações, postes, carros e etc) juntamente com a cobertura vegetal.

O NDVI como filtro de vegetação em nuvens de pontos se mostra muito sensível pelo fato de que a informação das bandas espectrais fusionadas com cada ponto da nuvem, pode

apresentar erros de atribuição de pontos que não são vegetação. Esta ocorrência se dá pelo fato de que a nuvem de pontos LiDAR apresenta projeção totalmente ortogonal, enquanto no ortomosaico, alguns objetos, principalmente os de maiores altura, apresentam um deslocamento projetivo, que contribui para ocorrência de possíveis erros nos cálculos do NDVI.

O E.R. em sua concepção original é um bom indicador de superfícies sem rugosidades, sendo que sua contribuição na identificação de edificações se mostrou eficiente, conforme apresentado por Höfle et al., 2009.

Dogon-yaro et al., (2016) utilizou apenas os dados LiDAR para separação da cobertura vegetal no ambiente urbano. Com a nuvem de pontos discreta juntamente com seus produtos derivados e utilizando os valores de rugosidade calculados pelo ER trouxe a separação da vegetação. Foi considerado o valor de 85% para E.R., porém o resultado não foi satisfatório devido à filtragem pelo ER trazer apenas pontos pertencentes a bordas de telhados e sua vizinhança, fazendo-se necessário a aplicação de filtros morfológicos (erosão e dilatação) para eliminar estas inconsistências ocasionadas pela filtragem do ER.

A separação da vegetação apenas pelos valores de E.R., como estudado por Dogon-Yaro et al., (2016) trouxe muitos pontos sobre as bordas e acima das edificações, e também pontos incidentes sobre outros objetos tais como: muros, linhas de transmissão e outros elementos que apresentam uma diferença de altura em relação a sua vizinhança.

4.4. Construção do Mapa de Vegetação

Com a nuvem de pontos filtrada para a cobertura vegetal obteve-se o Modelo Digital de Vegetação (MDV) contendo apenas a representação da superfície da vegetação separada para a área de estudo. O MDV foi binarizado sendo atribuído o valor 1 para os pixels que representam a vegetação. Este procedimento foi necessário pois a transformação da cobertura vegetal em vetor é realizada pela vetorização automática da vegetação sobre a imagem binarizada (Figura 4).

A última etapa envolvida na geração do mapa de vegetação para a área urbana consistiu na aplicação de edições no arquivo vetorial gerado. Estas edições objetivaram a remoção de pequenas áreas isoladas, identificadas como vegetação devido à alta sensibilidade do método de identificação e separação da cobertura vegetal. Nesta etapa foram eliminados os polígonos cuja áreas eram inferiores a 10 m². Sequencialmente foi aplicado uma suavização nos vetores representativos da vegetação com o intuito de melhorar a representação da informação vetorial. Esta etapa finda a construção automática do mapa de vegetação para área urbana.

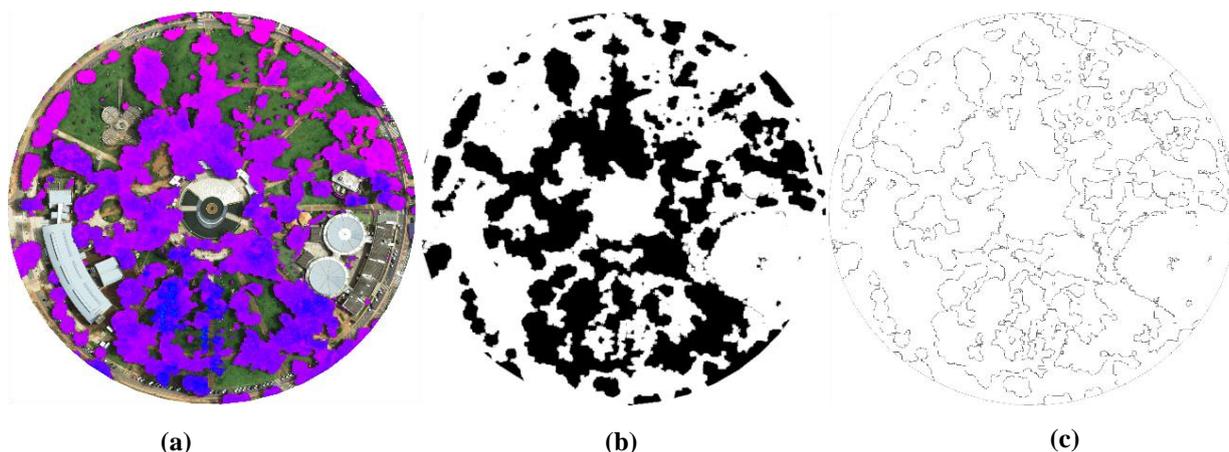


Figura 4. Etapas empregadas na construção do mapa de vegetação na área urbana: (a) MDV, (b) binarizado (c) resultado da vetorização automática.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A metodologia apresentada mostrou-se eficiente na separação da densa cobertura vegetal (média e alta) inserida no contexto urbano. Como apresentado, o resultado trouxe uma adaptação precisa da cobertura vegetal que pode ser evidenciada pela sobreposição do mapa de vegetação ao ortomosaico.

A combinação das três informações (altura dos objetos, NDVI e E.R) como filtro na separação dos pontos que representam a cobertura vegetal se mostrou satisfatória pois como já mencionado, a filtragem individual por cada um dos atributos apresenta limitações que, quando combinados, minimizam as inconsistências, trazendo uma melhora significativa na separação da vegetação.

Um resultado intermediário foi encontrado na filtragem da nuvem de pontos utilizando a combinação dos atributos, altura dos objetos e NDVI, porém, alguns erros anteriormente encontrados na separação da vegetação apenas pelo NDVI permaneceram quando os dois atributos foram combinados, ou seja, nas regiões com ocorrência de sombras e em telhados com diferentes padrões de cores, os erros na separação da vegetação ainda continuaram.

Nas regiões de taludes com declividade acentuada, a filtragem combinando estes dois atributos resultou em confusão na extração da vegetação. Nas regiões cobertas por gramíneas, o valor do NDVI estava acima de 0.3, e durante o processo de filtragem da nuvem de pontos para elaboração do MDT, os pontos foram removidos, pois foram considerados como alguma edificação. Ao realizar a álgebra entre o MDS e o MDT para construção do MDSn estes taludes foram representados com altura superior a 1 m, sendo seus pontos da nuvem de pontos LiDAR preservados devido a sua altura ter sido superior ao limiar de 0,80 m estabelecido. Para estas regiões os pontos separados erroneamente como sendo vegetação foram eliminados com a utilização do filtro pelo E.R., uma vez que os pontos incidentes nestas áreas apresentam altos valores de E.R., sendo então eliminados. A Figura 5 traz uma região de taludes sobreposta à nuvem de pontos da vegetação filtradas pelos atributos altura e NDVI (a) e o resultado da separação com os três filtros combinados (b).



Figura 5. Separação da nuvem de pontos da vegetação filtrada utilizando altura e NDVI (a) e altura, NDVI e E.R. combinados (b).

O parâmetro de filtragem “altura” define o tipo de cobertura vegetal que se deseja extrair (baixa, média e alta) uma vez que os valores do NDVI indicam as regiões com vegetação (inclusive vegetação rasteira – gramíneas) e o E.R. traz uma separação mais precisa da vegetação, eliminando alguns erros ocasionados pela limitação dos outros filtros para outras variáveis.

O mapa de vegetação obtido foi avaliado quanto ao nível de assertividade na extração da cobertura vegetal. Nesta análise foram avaliados, em conjunto com o ortomosaico, os 2242 polígonos gerados, sendo os mesmos classificados na forma de atributo como certo ou errado. A avaliação mostrou que dos 2242 polígonos gerados automaticamente representando a vegetação, apenas 172 deles não representavam a cobertura vegetal corretamente, ou seja, um erro de 7,7 % na geração automática de polígonos representantes da cobertura vegetal. Os 172 polígonos classificados como errados representam apenas 1,1% do valor em área (m²) medida. Estes polígonos, em sua maioria, localizam-se em áreas cobertas com gramíneas sobrepostas por linhas da rede de energia elétrica. Esta confusão foi ocasionada devido à linha da rede de transmissão de energia ser detectada no perfilamento LiDAR como um objeto de altura superior ao limiar estabelecido e com valor de NDVI característico de vegetação, pois durante a fusão das bandas com a nuvem de pontos, a estes foram atribuídas informações da vegetação gramínea da

imagem. As outras confusões foram detectadas em muros com gramínea ao redor, em algumas partes com ocorrência de sombras nas imagens e alguns telhados com material transparente (estufas).

O mapa de vegetação também foi analisado em conjunto com a restituição estereoscópica. A restituição estereoscópica da vegetação apresenta originalmente 464 objetos, representando apenas 20,7% dos objetos identificados pelo processo automático. Destes, 450 tiveram sua área comparada com os polígonos gerados no processo automático, uma vez que a interpretação do usuário gerou polígonos diferentes, os quais não apresentavam nem 50% das partes em comum, sendo estes descartados da análise. A Figura 6 apresenta a sobreposição dos polígonos analisados, sendo que, os que estão na cor vermelha correspondem a interpretação gerada pela restituição estereoscópica ao passo que os na cor azul, representam a vegetação extraída pelo método automático.

O resultado desta análise apresentou uma diferença de 11,7% nos valores de área (m²) entre os polígonos avaliados, sendo que a área medida nos polígonos do mapa de vegetação gerado no processo automático (285.553 m²) foi maior que a área obtida pelo método de restituição automática (252.051 m²). Este resultado pode ser considerado bom, levando-se em conta que, na restituição foram encontradas generalizações (omissões de polígonos representativos) para a representação da cobertura vegetal, fato este que pode ser visualizado na Figura 5 por meio das regiões retratadas pelos polígonos em azul (método automático), que não estão contidas na restituição (polígonos vermelhos). Esta análise também pode comprovar a boa adaptação entre ambos conjuntos de polígonos representativos de árvores e/ou conjunto de árvores individualizadas, sendo um fator de precisão no método automático.

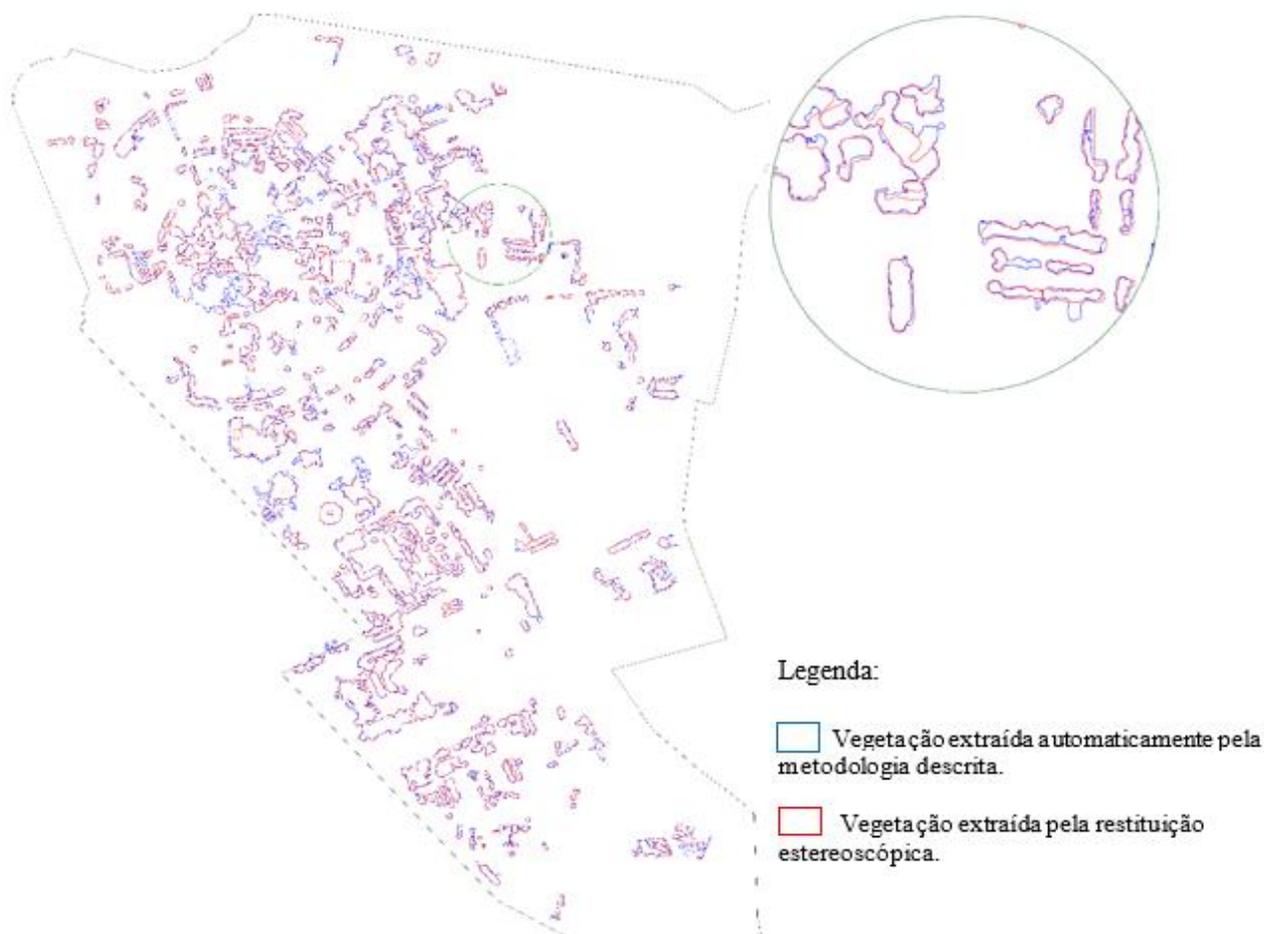


Figura 8. Polígonos com áreas avaliadas nos métodos de extração da vegetação automática (azul) e por restituição estereoscópica (vermelho).

Desta forma pode-se concluir que o método apresentado, quanto à possibilidade de utilização de fonte de dados compatíveis com a descrita, apresenta resultado satisfatório para a geração de mapa de vegetação em área urbana, sendo possível a sua realização de maneira rápida e automatizada

REFERÊNCIAS

CHANGNON, Stanley A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.

DOGON-YARO, M. A. et al. EXTRACTION OF URBAN TREES FROM INTEGRATED AIRBORNE BASED DIGITAL IMAGE AND LIDAR POINT CLOUD DATASETS-INITIAL RESULTS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 42, 2016.

FILIN, Sagi; PFEIFER, Norbert. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. **ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 2, p. 71-80, 2006.

GALLO, K. P. et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 32, n. 5, p. 899-908, 1993.

MANDLBURGER, G. et al. Orientation and processing of airborne laser scanning data (OPALS)—Concept and first results of a comprehensive ALS software. In: **ISPRS Workshop Laser scanning**, 2009.

HÖFLE, Bernhard et al. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data. **Proceedings of SilviLaser**, v. 2008, p. 8th, 2008.

HÖFLE, Bernhard; HOLLAUS, Markus. **Urban vegetation detection using high density full-waveform airborne lidar data-combination of object-based image and point cloud analysis**. na, 2010.

JENSEN, John R. et al. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Prentice-Hall Inc., 1996.

KARL, Thomas R.; DIAZ, Henry F.; KUKLA, George. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. **Journal of climate**, v. 1, n. 11, p. 1099-1123, 1988.

PARMEHR, Ebadat G.; AMATI, Marco; FRASER, Clive S. Mapping urban tree canopy cover using fused airborne LiDAR and satellite imagery data. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 3, n. 7, 2016.

RUTZINGER, Martin; HÖFLE, Bernhard; PFEIFER, Norbert. Detection of high urban vegetation with airborne laser scanning data. **Proceedings forestsat**, 2007.

FUNG, T.; SIU, W. Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 5, p. 1011-1024, 2000.

WOLF, Paul R.; DEWITT, Bon A.; WILKINSON, Benjamin E. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. McGraw-Hill Education, 2014.