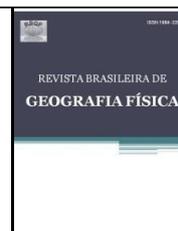




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Comparação de imagens multiespectrais utilizando Satélites e VANT para a análise de mudanças estruturais em área de Floresta Seca

Cloves Vilas Boas dos Santos¹, Magna Soelma Beserra de Moura², Josiclêda Domiciano Galvêncio³, Herica Fernanda de Sousa Carvalho⁴, Rodrigo de Queiroga Miranda⁵, Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁶

¹Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA); Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0002-2870-8030. E-mail: clovesvilasboas@gmail.com (Autor Correspondente). ²Ph.D.; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa do Trópico Semiárido (EMBRAPA/CPATSA). ORCID: 0000-0002-2844-1399. E-mail: magna.moura@embrapa.br. ³Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0001-7367-6587. E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br. ⁴Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA); Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0001-9155-6458. E-mail: herica.carvalho@ufpe.br. ⁵Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0002-5464-2397. E-mail: rodrigo.qmiranda@gmail.com. ⁶Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: 0000-0002-2520-5761. E-mail: suzanam.ufpe@gmail.com

Artigo recebido em 23/08/2021 e aceito em 20/10/2021

RESUMO

O sensoriamento remoto é muito importante na aquisição de informações para monitoramento de características estruturais da vegetação dos ecossistemas, e com o uso de índices espectrais é possível a análise de sua dinâmica em escala espaço-temporal. O presente estudo visa comparar produtos multiespectrais e com diferentes resoluções espaciais para a avaliação das características estruturais da caatinga por meio de imagens de satélite e VANT. Para a base de dados espacial foi utilizado um ortomosaico gerado a partir de imagens obtidas em câmera acoplada em VANT e imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2 para a área de caatinga. O vigor da vegetação verde foi analisado por meio do cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e verificado por meio da correlação com as imagens adquiridas com VANT em relação as imagens dos satélites. O NDVI obtido a partir do VANT descreveu bem os alvos de solo, vegetação verde e até mesmo os galhos secos existentes no sítio de estudo, sendo constatado também que em função da resolução espacial e do detalhamento das imagens adquiridas pelo VANT, as imagens dos satélites tiveram algumas limitações na identificação de áreas de solo exposto. No entanto, os produtos do Sentinel 2 e Landsat 8 mostraram-se eficazes na avaliação do vigor da vegetação, com destaque para as imagens do Sentinel 2 que obteve uma melhor correlação ($r = 0,7$) com as imagens aéreas de VANT, em comparação com o Landsat-8 ($r = 0,6$). Conclui-se que os produtos de satélite avaliados foram bons indicadores para a análise das características estruturais da vegetação na Caatinga, no entanto, não são indicados para avaliações de áreas com maior predominância de solo, água ou outros alvos, pois eles podem interferir nos valores de NDVI por meio da mistura de alvos e isso interferir em uma avaliação mais detalhada das áreas.

Palavra-chave: Sensoriamento Remoto, Imagens de Satélite, VANT, NDVI, Floresta Seca.

Comparison of multispectral images using satellites and UAV for the analysis of structural changes in a dry forest area

ABSTRACT

Remote sensing is very important in the information acquisition for monitoring the structural vegetation characteristics in ecosystems, and with the use of spectral indices it is possible to analyze its dynamics on a spatiotemporal scale. The present study aims to compare multispectral products with different spatial resolutions to evaluate the structural characteristics of the caatinga using satellite and UAV images. For the spatial database, an ortho mosaic was used, generated from images obtained in a camera coupled to a UAV and images from the Landsat 8 and Sentinel 2 satellites for the caatinga area. The vigor of green vegetation was analyzed through the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and verified through the correlation with the images acquired with UAV in relation to the satellite images. The NDVI obtained from the UAV well described the soil targets, green vegetation and even the dry

branches existing in the study site, and it was also found that, due to the spatial resolution and images detail acquired by the UAV, the satellite images had some limitations in identifying exposed soil areas. However, the Sentinel 2 and Landsat 8 products proved to be effective in assessing the vigor of vegetation, with emphasis on the Sentinel 2 images which obtained a better correlation ($r = 0.7$) with aerial UAV images compared to Landsat-8 ($r = 0.6$). It is concluded that the evaluated satellite products were good indicators for the analysis of the structural characteristics of the vegetation in the Caatinga, nonetheless they are not indicated for the evaluation of areas with greater predominance of soil, water or other targets, as they can interfere with the NDVI values through the mix of targets, and this interfere in a more detailed assessment of the areas.

Keywords: Remote Sensing, Satellite Images, Drones, UAV, Dry Forest.

Introdução

O Sensoriamento Remoto (SR) pode ser entendido como a ciência, técnica ou processo de aquisição que permite avaliar a superfície sem o contato direto com os alvos existentes (Cardoso et al., 2021). Nos últimos anos tem-se percebido que o SR tem avançado na tecnologia por meio de constantes aprimoramentos em seus sistemas de sensores (Bezerra et al., 2018).

As tecnologias aplicadas no SR têm proporcionado avanços no conhecimento sobre diferentes formas de análise espacial, e isso se deve a vários fatores, dentre eles a maior capacidade de aquisição de dados em tempo real e em larga escala (Sampaio et al., 2020), bem como, a disponibilidade dos produtos, pois muitos deles são adquiridos gratuitamente (Silva Junior et al., 2021). Isso possibilita análises espaço-temporais com vistas ao entendimento, sobretudo, da biomassa e das condições hídricas das plantas ou de uma extensa área vegetada.

Existem muitos tipos de dados orbitais por meio de sensoriamento remoto, com diferentes resoluções espaciais, radiométricas, temporais e espectrais obtidas e que são utilizados em diversos tipos de monitoramentos, e por meio da análise desses dados é possível obter informações importantes para o monitoramento dos recursos naturais (Souza et al., 2016).

O uso de imagens obtidas por meio do SR de média resolução espacial, a exemplo dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2, cujos lançamentos de acordo com Bezerra et al. (2018), ocorreram em 2013 e 2015, respectivamente, tem ganhado grande aplicabilidade em estudos de monitoramento ambiental, Miranda et al., (2018) e modelagem de bacias hidrográficas, Galvincto e Luz (2021), Soares e Galvincto (2020), Bandim e Galvincto (2020), França et al., (2019) e Morais et al., (2017).

A série Landsat tem sido uma importante fonte de informação para análises de uso e cobertura da terra, e tem resultado em longas análises ambientais espaço-temporais (Santos et al., 2017; Silva Júnior et al., 2021), que permitem estudos de longo prazo sobre a dinâmica vegetacional. Isso tem sido possível em função do extenso acervo histórico de cenas (Bertucini Junior & Centeno, 2016). Já o Sentinel 2 é um satélite da

Agência Espacial Europeia que compreende duas missões (Sentinel 2A e Sentinel 2B) lançadas em 2015 e 2017, respectivamente (Sánchez et al. 2018). O Sentinel 2 possui uma resolução espacial de 10 metros e uma resolução temporal que permite avaliações espaço-temporais, permitindo assim o monitoramento da sazonalidade de uma vegetação (Khaliq et al., 2019).

O uso dos Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) tem sido crescente em monitoramentos ambientais e em estudos agrícolas (Sampaio et al., 2020; Gomes et al., 2021). A utilização de VANTs nesses estudos proporciona melhorias na qualidade das informações adquiridas, pois é possível controlar desde a altitude até as repetições dos voos, dependendo das condições ambientais (Gomes et al., 2021), resultando em melhor escala espacial e temporal.

Com o processamento digital de imagens é possível por meio de operações matemáticas em bandas, calcular índices espectrais. Segundo Shiroma et al. (2020), é comum o uso desses índices espectrais em estudos voltados para a análise da cobertura vegetal. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi um índice foi proposto por Rouse et al. (1973) e utiliza regiões do vermelho e infravermelho em um processo de diferença normalizada pela soma, o que vem a realçar na imagem, a vegetação fotossinteticamente ativa (Santos et al., 2017), sendo possível analisar as características fisiológicas e fenológicas das plantas, possibilitando a variação espaço-temporal da verdura da vegetação. Os índices de vegetação são sensíveis as diferentes características da vegetação - clorofila, nutrientes, pigmentos, biomassa e teor de água nas folhas (Giovos et al., 2021), dentre outros.

Inovadores estudos tem procurado usar imagens de VANT para obtenção de variáveis físicas da superfície, NDVI, Galvincto e Naue (2020); temperatura da superfície, Galvincto (2020).

O NDVI tem sido aplicado em imagens obtidas em VANTs para diversos estudos ambientais, a exemplo de Gomes et al. (2021) comparando diferentes câmeras multiespectrais; e de Khaliq et al. (2019) analisando áreas agrícolas

com imagens de satélite e de VANT. Sampaio et al. (2020) comparou imagens de VANT e de satélite para avaliação do NDVI em área de pastagem. Outras aplicações do NDVI em imagens de satélites multiespectrais para a caatinga são apresentadas nos estudos de Lima Júnior et al. (2014), que propõem o uso do índice na geração de modelo para estimativa da biomassa lenhosa na Caatinga; Santos et al. (2017) e Brito et al. (2020) analisando a sazonalidade da Caatinga; Bezerra et al. (2018) para avaliação da cobertura vegetal em região semiárida; Lima et al. (2019) analisando o comportamento espectral do vigor da vegetação utilizando imagens de satélite de alta e média resolução para estudos de uso e cobertura do solo.

Tem-se adotado com maior frequência o uso das geotecnologias nos estudos dos biomas (Cardoso et al., 2021). É importante que se amplie para as mais diversas superfícies vegetadas, com destaque para o bioma caatinga, onde estudos de análises de uso e cobertura da superfície ainda são considerados incipientes. De acordo com Cardoso et al. (2021), a vegetação do Bioma Caatinga possui características muito peculiares, sendo uma região que tem forte influência dos regimes pluviométricos, começando suas transições de período seco para chuvoso a partir dos primeiros volumes de chuva.

A Caatinga é um bioma representativo do semiárido brasileiro (Giongo et al., 2011), representando um patrimônio biológico para a região semiárida, sendo o quarto maior bioma do Brasil, considerado também uma das mais extensas regiões secas do mundo. Apresenta características peculiares como altas temperaturas e grandes variações pluviométricas que repercutem em grandes mudanças no aspecto da vegetação e em suas fases fenológicas.

O presente estudo visa comparar produtos multiespectrais e com diferentes resoluções espaciais para a avaliação das características estruturais da vegetação de caatinga.

Material e Métodos

Área de Estudo

A pesquisa foi realizada em uma área de caatinga preservada do município de Petrolina-PE, situada no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) (Figura 1).

A área de caatinga está preservada há mais de 40 anos, sendo composta por uma vegetação

arbustivo arbórea, hiper xerofílica com plantas de altura média de 5 m (Souza et al., 2017), com predominância das espécies da Tabela 1.

O local de estudo possui temperatura média anual de 26 °C e precipitação anual em torno de 510 mm (Souza et al., 2015; 2017). No entanto, a região tem apresentado precipitações abaixo da média desde 2012 (Santos et al., 2020). Nos meses de maior estiagem na Caatinga, há elevada demanda evaporativa causa estresse hídrico nas espécies vegetais (Souza et al., 2015), fazendo com que percam suas folhas na estação seca (Alberton et al., 2019; Oliveira et al., 2006).

Tabela 1. Família e espécie das plantas arbustivo-arbóreas predominantes na área de caatinga, Petrolina, PE.

Família	Nome Botânico
Fabaceae	<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altshul
Leguminosae	<i>Commiphora leptophloeos</i> Mart. J.B. Gillett
Euphorbiaceae	<i>Cnidoscolus quercifolius</i> Pohl
Euphorbiaceae	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm
Euphorbiaceae	<i>Croton conduplicatus</i> Humb
Leguminosae	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.
Anacardiaceae	<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão
Anacardiaceae	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl
Anacardiaceae	<i>Spondias tuberosa</i> Arruda

Fonte: Maia (2012); Lima Júnior et al. (2014).

Base de dados espacial

VANT e câmera multiespectral Mapir Survey 3

Foi realizado um voo planejado com um VANT modelo DJI Phantom 3 Standard equipado com a câmera multiespectral Mapir Survey 3N (RG NIR) e um GPS de navegação para o registro da geolocalização das fotos.

Para o planejamento do voo foi utilizado o aplicativo DJI GSP (Ground Station Pro) instalado em um Ipad para visualização e acompanhamento do voo. A câmera multiespectral foi programada para fazer registros das imagens em intervalos de 5 segundos.

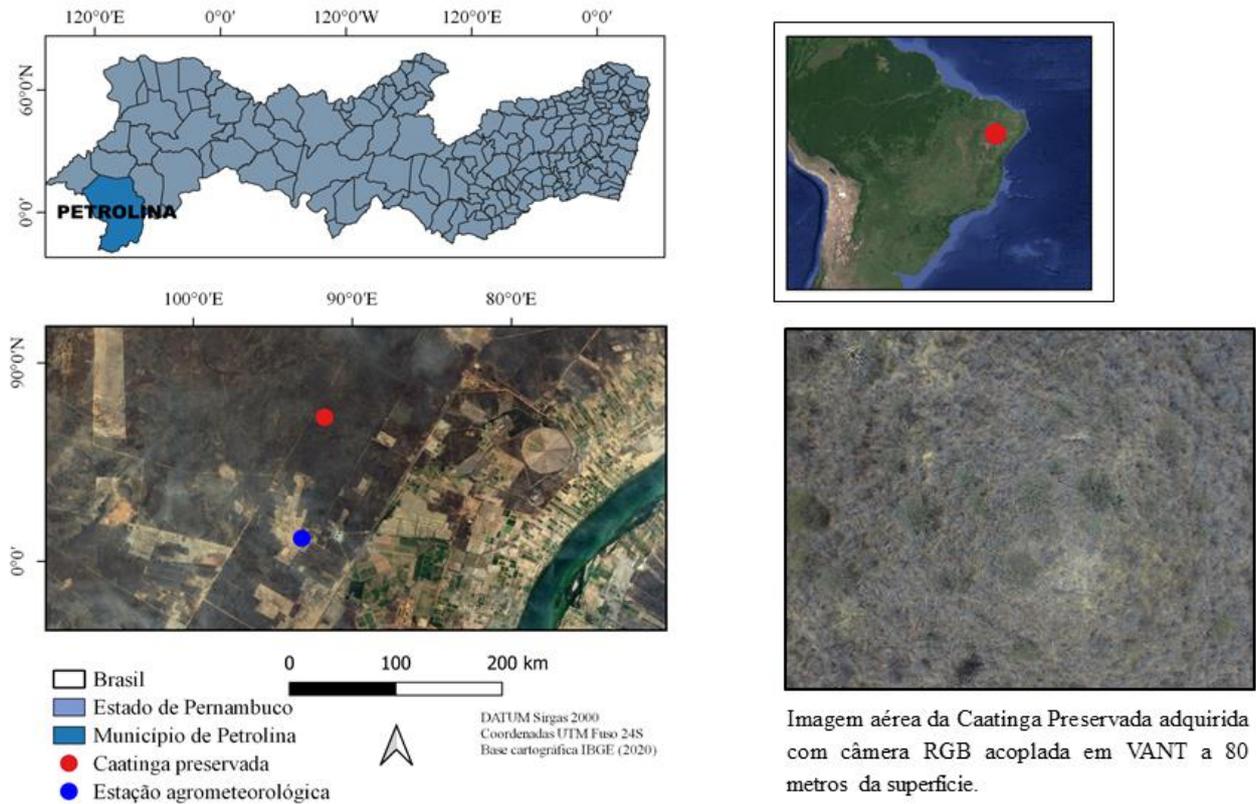


Figura 1. Localização da área de Caatinga preservada na Embrapa Semiárido no município de Petrolina-PE.

As datas de aquisição das imagens (VANT e satélite) encontram-se na Tabela 2. A campanha com VANT ocorreu em dezembro de 2019, com voo realizado a 80 m acima da superfície, por volta das 11h00 (horário local). Detalhes técnicos sobre a câmera utilizada no presente estudo são apresentados na Tabela 3.

Sensor MSI (Satélite Sentinel 2)

As imagens do Sentinel 2 foram adquiridas gratuitamente por meio da plataforma Copernicus (ESA) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), totalizando duas cenas do sensor MSI (*Sensor Multispectral Imager*) a bordo do Satélite Sentinel 2. A imagem selecionada corresponde ao dia mais próximo da data do voo com VANT, na tentativa de representar a caatinga com datas e períodos semelhantes.

O Sentinel 2 é equipado com um sensor multiespectral que mede a radiância do topo da atmosfera da Terra (TOA), em 13 bandas espectrais com comprimentos de onda variando de 443 a 2190 nm (Khaliq et al., 2019), resolução espacial de 10 metros e temporal de 5 dias.

Para este estudo, foi utilizado o produto de reflectância da superfície com correção atmosférica (L2A).

Sensor OLI (Satélite Landsat-8)

Foram adquiridas gratuitamente por meio da plataforma do Serviço Geológico Americano (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) cenas do sensor OLI (*Operational Land Images*) a bordo do Satélite Landsat-8. O produto utilizado foi o refletância da superfície (*Land Surface Reflectance*). As imagens do Satélite Landsat 8 possuem uma resolução espacial de 30 metros e temporal de 16 dias. Foi selecionada a imagem com data mais próxima ao voo do VANT (Tabela 2). Informações sobre os sensores de satélite e acoplado no VANT são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2. Informações sobre conjuntos de dados adquiridos com base nos Satélites e UAV utilizados no presente estudo.

Data de aquisição de imagens	Fonte dos dados (Plataforma)	Tempo de diferença em relação ao UAV
05/12/2019	Sentinel 2	- 1 dia
06/12/2019	UAV	0
09/12/2019	Landsat 8	+ 3 dias

Tabela 3. Informações das bandas e altitude das plataformas de aquisição dos dados.

	Sensor OLI	Sensor MSI	Mapir Survey 3
Número de bandas	9	13	3
Faixa espectral	Red (640-670) NIR (850-880)	Red (650-680) NIR (785-900)	Red (640-680) NIR (820-880)
Resolução espacial	30 m	10 m	5 cm
Altitude	705 km	786 km	80 m

Processamento dos dados e cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Para a fase de processamento das imagens adquiridas em campo com o drone, foi utilizado o Software Agisoft PhotoScan, passando pelo processo de alinhamento das fotos, nuvem de pontos, construção de modelo e textura, modelo digital de elevação (DEM) para a geração do Ortomosaico. A imagem foi recortada com o limite da área de interesse, conforme apresentado na Figura 2.

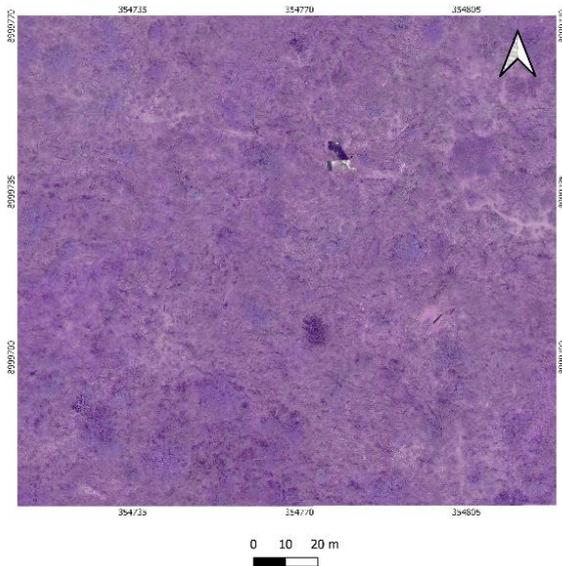


Figura 2. Composição falsa-cor da área de estudo no dia 06/12/2019 a partir do mosaico das imagens de VANT.

Por meio do Software Qgis versão 3.10, foi calculado o NDVI (Equação 1) nos ortomosaicos gerados, pois é um dos índices mais utilizados em estudos e pesquisas e tem por objetivo a análise do verdor da vegetação utilizando um processo de diferença normalizada entre NIR e o vermelho (Giovos et al., 2021; Jião et al., 2021).

Para o cálculo do NDVI foram utilizadas as bandas vermelho e infravermelho próximo, conforme a metodologia de Rouse et al., (1973) (Equação 1).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{Eq. (1)}$$

Foram extraídos a média dos valores de NDVI da câmera Mapir Survey 3N que estavam incluídos dentro do limite de cada pixel tomando como referência os limites dos pixels das imagens dos satélites.

Para a comparação dos dados de satélites em relação à câmera multiespectral foi utilizado o conjunto de pixels do limite da área na imagem do VANT que correspondeu ao limite do pixel na imagem de satélite, ou seja, a média do conjunto dos pixels da imagem do VANT correspondente ao valor de um pixel da imagem de satélite.

Para fins de avaliação e comparação de resultados com outras plataformas de observação da terra, foi extraído também os dados de NDVI do pixel correspondente a área analisada obtido por meio dos produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 (Índices de Vegetação) do sensor MODIS a bordo do Satélite Terra/Aqua por meio da plataforma por meio de uma plataforma eletrônica da NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<https://modis.oml.gov/cgibin/MODIS/global/subs et.pl>).

Para analisar de forma detalhada a relação entre os diferentes produtos adquiridos nas plataformas de aquisição de imagens, as informações das três imagens foram utilizadas, sendo uma campanha aérea com VANT com imagens de alta resolução espacial e duas imagens de satélites com curto período de diferença entre os dias de aquisição, conforme a Tabela 2. Os dados foram avaliados por meio do coeficiente de correlação de Pearson (*r*) com o intuito de avaliar diferentes produtos a partir de imagens na análise da estrutura da Caatinga.

Resultados e discussão

A análise da estrutura da Caatinga com as imagens foi focada na avaliação da verdura da vegetação por meio do NDVI. A imagem do VANT foi adquirida em um momento em que a caatinga ainda estava em período seco (Figura 3), quando se registrou apenas 7,2 mm de chuva nos 11 dias antecedentes a aquisição das imagens (Figura 4).

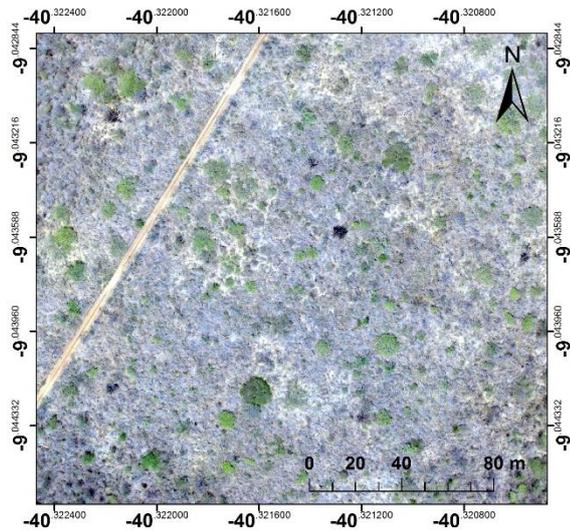


Figura 3. Ortomosaico em composição RGB da área de caatinga preservada em Petrolina, PE.

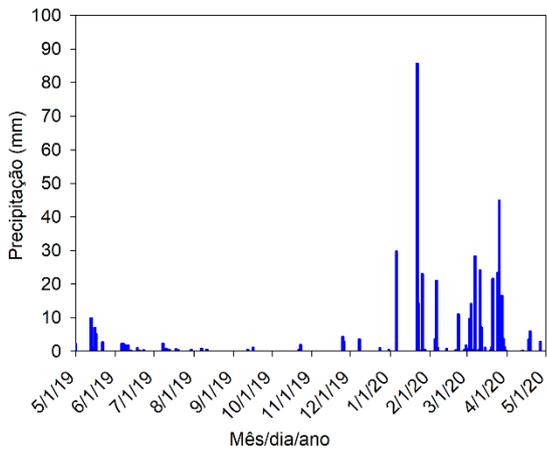


Figura 4. Precipitação pluviométrica em área de Caatinga preservada entre maio de 2019 e abril de 2020 em Petrolina-PE.

Visualizando os três produtos de NDVI (Figura 5), é verificado que na mesma escala de valores, a verdura da vegetação está em desacordo, entendendo que os produtos a partir dos satélites generalizaram os valores em função da não identificação de diferentes alvos dentro dos limites estabelecidos, o que já é esperado em função da resolução espacial e sua relação com a mistura de alvos (Silva Júnior et al., 2021).

De acordo com Souza et al. (2016), a alta resolução espacial é um dos fatores que proporcionam melhores distinções entre os objetos na superfície, e isso pode ser observado no presente estudo conforme Figura 5. Os 5 cm de resolução da câmera multiespectral acoplada ao VANT, considerando a altitude de 80 metros possibilitou claramente a identificação da copa de árvores, sendo possível diferenciá-la dos outros objetos como as áreas de solo. De acordo com o estudo de Giovos et al. (2021), as informações de NDVI extraídas de área de agricultura mostraram também

o quanto os valores de pixels em alta resolução variam em relação a imagens de satélites.

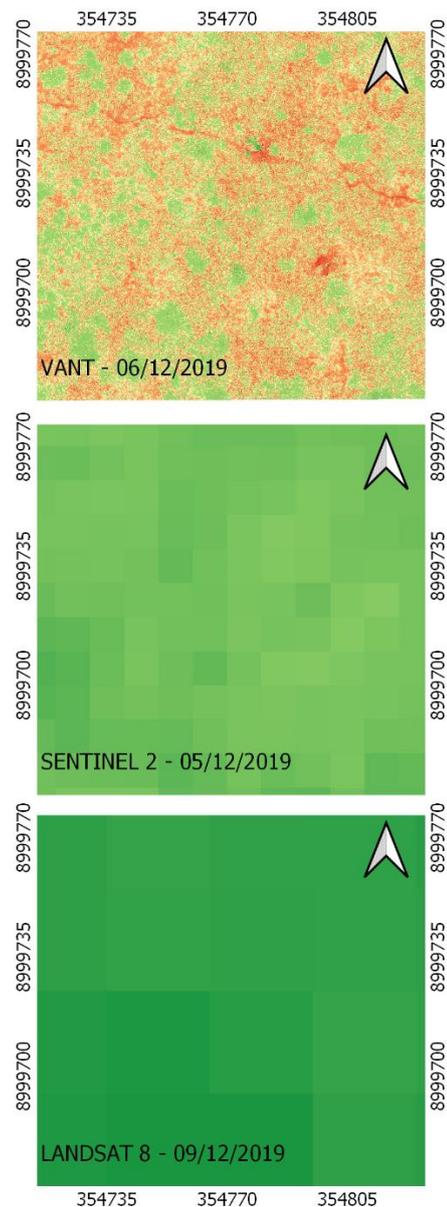


Figura 5. NDVI obtido em imagem do VANT, Sentinel 2 e Landsat 8 para área de caatinga, Petrolina, PE.

Os valores de NDVI gerados por meio do VANT, em geral se mostraram inferiores em relação aqueles obtidos para outras plataformas. O VANT, o Sentinel 2 e o Landsat 8 apresentaram

valores médios do NDVI de 0,1, 0,2 e 0,4, respectivamente (Figura 6). Gomes et al. (2021), em estudo com a câmera Mapir acoplada ao VANT, também obtiveram esse padrão no comportamento dos dados, e apontaram que tais diferenças estariam associadas às características da câmera, que diferente de outras multiespectrais, essa câmera possui apenas um sensor para detectar as três bandas, ou seja, a captura das imagens nas três bandas é feita com a mesma configuração, com isso, o sinal de cada banda pode ser afetado pela abertura do obturador que não é ajustado para cada banda, como isso, o espectro de radiação processado pelo sensor pode interferir nos números digitais das bandas.

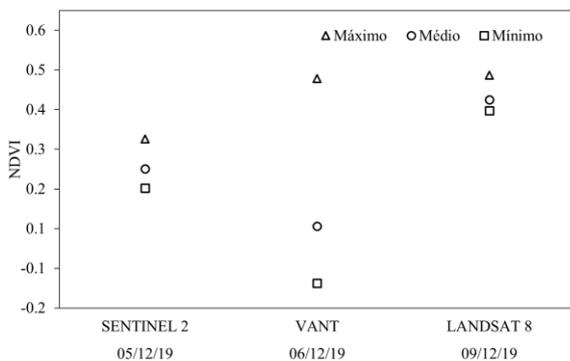


Figura 6. Estatística descritiva do NDVI das imagens do Sentinel 2, Landsat 8 e VANT, para área de Caatinga preservada, em Petrolina, PE.

Felix (2018) encontrou valores semelhantes em fragmentos florestais de Cerrado com NDVI variando entre -0,067 a 0,008. Tagliarini (2020) em áreas com floresta estacional semidecídua identificou mais de 50% da área com NDVI variando entre 0,00 e 0,4.

Ao visualizar a imagem de alta resolução por meio da câmera acoplada ao VANT, compreendemos que as imagens de satélites possuem algumas limitações na detecção de alvos específicos devido a resolução espacial, o que foi observado nas informações sobre o estado da vegetação e pode ter como consequências a alteração de valores pela influência de outros alvos, causando interferências negativas na radiação adquirida pelas imagens, dificultando assim a avaliação geral.

Khaliq et al. (2019) apontam que no contexto da agricultura, a presença de solo nas entrelinhas de uma área cultivada altera significativamente o cálculo dos índices espectrais. Portanto, foi observado que, em se tratando de pequenas áreas, é recomendado o uso de maiores resoluções espaciais para uma melhor identificação dos alvos existentes.

Essas variações em alvos existentes representam áreas com a presença do solo influenciando os valores do NDVI, e estão de acordo com os estudos de Sampaio et al. (2020). Estes autores analisaram outro modelo de câmera multiespectral, e obtiveram valores de NDVI variando de 0,41 a 0,8 para áreas de pastagem. Santos et al. (2020), utilizando também a câmera Mapir Survey 3 a bordo do VANT em área de agricultura, encontraram valores máximos de NDVI de 0,69 quando a cultura do milho já estava no estágio mais avançado.

Resultados semelhantes foram determinados por Lima et al. (2019) uma área na Caatinga com escala de bacia hidrográfica, encontrando valores médios NDVI para Landsat 5 e Sentinel 2 de 0,30 e 0,34, respectivamente. Silva Júnior et al. (2021) determinaram valores de NDVI variando entre 0,20 e 0,86 para área de bacia hidrográfica analisando imagens da série Landsat e do Sentinel 2.

Os valores de NDVI a partir dos dados de satélites estão de acordo com outras plataformas multiespectrais, a exemplo do sensor MODIS que em dezembro de 2019, apresentou no local do presente estudo valor de NDVI de 0,35, o que mostra que as informações dos satélites foram semelhantes.

O NDVI obtido a partir do VANT descreveu bem os alvos existentes da área de estudo, sobretudo solo, vegetação verde e até mesmo os galhos secos existentes nesse período do ano, em que a caatinga encontra-se no seu período mais seco (Figuras 3 e 5), quando foram registrados apenas dois eventos de chuva com 11 e 10 dias de antecedência ao imageamento com VANT, totalizando apenas 7,2 mm (Figura 4), o que mostra que não houve quantitativo de chuva que pudesse resultar em respostas diretas no NDVI da Caatinga.

O vigor da vegetação da caatinga é muito influenciado pelo quantitativo de chuvas, e isso repercute diretamente na resposta ao NDVI, sendo verificado em outros estudos aplicados a regiões da Caatinga a exemplo de Lima et al. (2019) onde ao analisar a mesma região em momentos diferentes, percebeu-se que o quantitativo de chuvas, em especial 5 dias antecedentes ao imageamento, teve respostas no vigor da vegetação e nos valores de NDVI. Da mesma forma ocorreu no estudo de Silva Júnior et al. (2020) que mostraram que houve pouca chuva no período de aquisição das imagens, consequentemente valores mais reduzidos de NDVI, ocorrendo o contrário em áreas próximas dos cursos hídricos onde aparecem valores de NDVI mais elevados.

A Figura 7 apresenta o padrão de comportamento do NDVI comparando o conjunto de pixels do VANT dentro da delimitação de cada

pixel das imagens de satélite. Verificou-se que mesmo com escalas de valores diferentes, os produtos possuem comportamentos semelhantes ao longo da imagem.

A análise foi realizada considerando a resolução espacial das imagens do VANT, com 0,05 m, e as imagens de satélite, com 10 e 30 m, Sentinel 2 e Landsat 8, respectivamente (Figura 7). A correlação ou similaridade entre os mapas foi verificada por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r) em que os valores obtidos mostraram semelhanças entre as variáveis conforme a Figura 8.

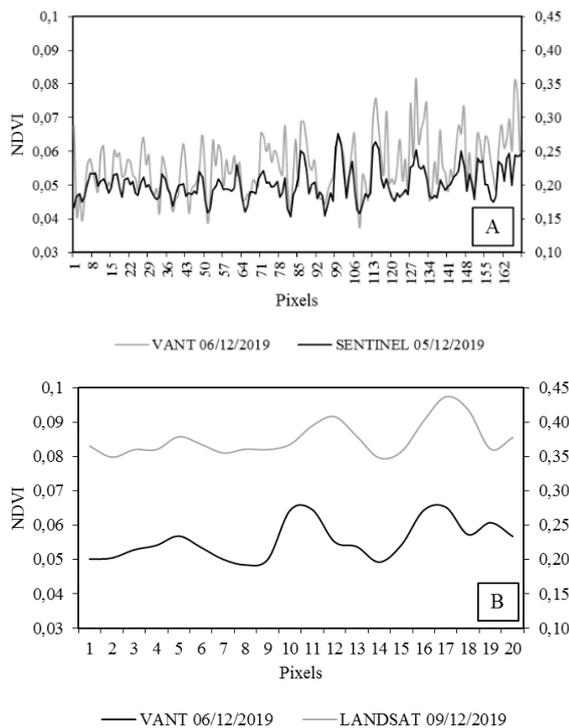


Figura 7. Comportamento do NDVI entre os diferentes produtos. A) VANT e Sentinel 2; B) VANT e Landsat 8.

A análise de correlação mostrou que há similaridade entre as imagens avaliadas, mesmo considerando as diferentes escalas espaciais, com coeficientes de correlação superiores ($r = 0,73$) para VANT e Sentinel 2, em comparação com aquele obtido para VANT e Landsat 8 ($r = 0,65$) (Figura 7). No estudo de Neves & Mucida (2020) em áreas do Bioma Cerrado, os autores compararam o NDVI em diferentes satélites, concluíram que os mapas de NDVI comparados entre satélites de maiores resoluções espaciais obtiveram melhor qualidade nos resultados.

Os resultados apresentados estão em concordância com os encontrados por Khaliq et al. (2019) também com câmeras multiespectrais na avaliação do NDVI de alta resolução em relação ao Sentinel 2 no monitoramento do status de cultura

do vinhedo e seus coeficientes de correlação chegaram a ser maiores que 0,6, no entanto, também ressaltaram o fator de interferência de outros alvos nos valores de NDVI com a presença de solo exposto nas fileiras da área analisada. Já em comparações com imagens Landsat 8, os resultados do presente estudo concordam com Sampaio et al. (2020), que relacionando NDVI de câmera multiespectral com Landsat também obtiveram coeficiente de correlação $r = 0,6$ em pastagem irrigada.

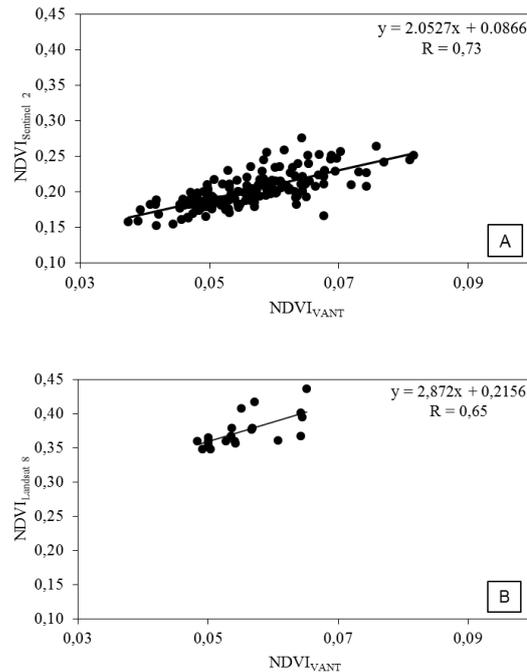


Figura 8. Modelo de regressão linear com coeficiente de correlação de Pearson (r) para NDVI obtido com as imagens. A) VANT e Sentinel 2; B) VANT e Landsat 8.

Foi observado que os padrões de NDVI foram semelhantes, embora tenham sido com valores diferentes entre a câmera multiespectral e as imagens de satélites. É válido ressaltar que a câmera Mapir Survey 3N discretizou melhor a vegetação, identificando muito bem os alvos de solo e vegetação. Para avaliações espaciais de monitoramentos para o contexto de florestas com as características da caatinga, todos os produtos são recomendados, e a seleção da resolução espacial da imagem depende dos objetivos do estudo e do nível de detalhamento necessário.

A câmera Mapir Survey 3N foi adequada para a análise e identificação dos diferentes alvos, o que é mostrado bem nas variações dos dados conforme apresentado na Figura 5, no entanto, avaliações em escala espaço-temporal são necessários para verificar como são as variações no

comportamento da floresta ao longo do tempo, incluído o período chuvoso e as transições seco-chuvoso e chuvoso-seco. O estudo de Gomes et al. (2021) traz uma abordagem de uso dessa câmera para o contexto para áreas com agricultura.

Conclusões

A uso do VANT com imagens em alta resolução espacial para avaliação da vegetação de caatinga permite a identificação de diferentes alvos da cena, identificando muito bem a vegetação verde, os galhos secos e o solo exposto.

Os dois produtos de NDVI obtidos a partir dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2 mostraram-se com eficácia satisfatória para análises da estrutura da Caatinga, com destaque para o Sentinel 2 cuja correlação com imagens de VANT foi mais elevada, mostrando-se como um bom indicador do status de verdura da vegetação em função da capacidade que ela tem em detectar melhor a variabilidade da vegetação caracterizada por diversas espécies vegetais, e em diferentes estágios de verde.

As imagens de satélite tiveram algumas limitações na identificação de alvos de solo em relação ao VANT, e isso principalmente em áreas de caatinga preservada pode interferir em análises mais detalhadas em solos, sendo recomendado o uso de plataformas com maior resolução espacial, caso o objeto de estudo esteja na análise detalhada em que se espere identificar alvos mais específicos como solo e vegetação.

Foi verificado que estudo do status da vegetação com o NDVI calculado a partir das imagens dos satélites, visualmente estavam diferentes em relação as imagens de drone em função das suas características, pois além da resolução espacial, as faixas entre as bandas também são diferentes para cada sensor, no entanto, novas pesquisas são sugeridas com o objetivo de identificar essas mudanças para que se tenha uma melhor identificação possível dos alvos existentes.

A possibilidade de mudanças de escalas entre os sensores analisados deve considerar a dinâmica vegetacional resultante da variabilidade das precipitações, que tem impacto na formação de folhas e na cobertura do solo, e portanto, deve ser proposta após avanços nos estudos.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão

das bolsas concedidas a Cloves Vilas Boas dos Santos (Processo IBPG 0813-9.25/17), Herica Fernanda de Sousa Carvalho (Processo IBPG 1062-9.25/18), Rodrigo de Queiroga Mirada (Processo APQ 0646-9.25/16). Os autores também agradecem a FACEPE pelo financiamento do Projeto “Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d’água e da fenologia em áreas de Caatinga” (Processo APQ 0062-1.07/15). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade de pesquisa concedida a Josiclêda Domiciano Galvínio (Processo PQ 302934/2018-9) e pelo financiamento do Projeto Universal (Processo 402834/2016-0). A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido por meio do Laboratório de Agrometeorologia coordenado por Magna Soelma Beserra de Moura pela infraestrutura para a realização dos trabalhos.

Referências

- Bandim, C. G., Galvínio, J. D. 2021. Mapeamento das áreas de armazenamento de água em depressão, usando dados LIDAR: Estudo de caso avenida Caxangá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 058-067. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p058-067>
- Alberton, B., Torres, R. S., Sanna, Silva, T. S. F., Rocha, H. R., Moura, M. S. B., Morellato, L. P. C., 2019. Leafing patterns and drivers across seasonally dry tropical communities. *Remote Sensing*, 11, 19, 2267.
- Bezerra, U. A., Oliveira, L. M. M., Candeias, A. L. B., Silva, B. B., Leite, A. C. L. D. S., Silva, L. T. M. D. S., 2019. Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI-Satélite Landsat-8 e MSI-Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41, 167-177.
- Bertucini Junior, J. J., Centeno, J. A. S., 2016. Registro de série de imagens Landsat usando correlação e análise de relação espacial, *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22, 685-702.
- Brito, P. V. S., Santos, T. O., Morais, Y. B. C. B., 2020. Análise da sazonalidade da vegetação de caatinga do município de Petrolina (Pernambuco) a partir de imagens do satélite Landsat 8-OLI. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 1, 29-37.
- Cardoso, P. V., Silva Seabra, V., Xavier, R. A., Morais Rodrigues, E., 2021. Mapeamento de Áreas de Caatinga Através do Random Forest: Estudo de caso na Baía do Rio Taperoá. *Revista Georaguai*, 11, 55-68.

- Felix, F. C., 2018. Comportamento sazonal de coberturas vegetais a partir de imagens de sensores embarcados em Veículo Aéreo não Tripulado. Dissertação (Mestrado). Alfenas, UNIFAL.
- França, L., Diaz, C., Reis, J., Costa, V., Galvêncio, J. 2019. Efeitos da precipitação na vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(6), 2377-2391.
doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2377-2391>
- Galvêncio, J. D. Luz, G. G. 2021. Desenvolvimento de Modelo que Estima o Impacto do CO2 Atmosferico nas Precipitações do Estado de Pernambuco, utilizando ARIMA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 1840-1851.
Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1840-1851>
- Galvêncio, J. D. Luz, G. G. 2021. Desenvolvimento de Modelo que Estima o Impacto do CO2 Atmosferico nas Precipitações do Estado de Pernambuco, utilizando ARIMA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 1840-1851.
Doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1840-1851>
- Galvêncio, J. (2019). Estimation of surface temperature with images obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9(6), 397-406.
doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.6.p397-406>
- Galvêncio, J., & Naue, C. (2020). Estimation of NDVI with visible images (RGB) obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9(6), 407-420.
doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.6.p407-420>
- Giongo, V., Cunha, T. J. F., Mendes, A. S. M., GAVA, C. A. T., 2011. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6, 1233 – 1253.
- Givos, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N., Priovolou, A., 2021. Remote Sensing Vegetation Indices in Viticulture: A Critical Review. *Agriculture*, 11, 457.
- Gomes, A., Queiroz, D. M. D., Valente, D. S., Pinto, F. D. A. D. C., Rosas, J. T., 2021. Comparing a single-sensor camera with a multisensor camera for monitoring coffee crop using Unmanned Aerial Vehicles. *Engenharia Agrícola*, 41, 87-97.
- Jiao, W., Wang, L., McCabe, M. F., 2021. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112313.
- Khaliq, A., Comba, L., Biglia, A., Aimonino, D. R., Chiaberge, M., Gay, P., 2019. Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. *Remote Sensing*, 11, 436.
- Lima Junior, C., Accioly, L. J. O., Goingo, V., Lima, R. L. F. A., Sampaio, E. V. S. B., Menezes, R. S. C., 2014. Estimativa de biomassa lenhosa da Caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. *Scientia Forestalis*, 42, 289-298.
- Lima, N. A. S., Oliveira, L. M. M., Xavier, M. L. P., Silva Júnior, U. J., Nascimento, E. F., 2019. Spectral Indices for remote sensing with the LANDSAT-5 and SENTINEL-2 satellites around the Poço Cruz reservoir-PE, 9, 299-309.
- Maia, G. N., 2004. Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades, Printcolor Gráfica e Editora, Fortaleza, 413.
- Miranda, R. Q., Galvêncio, J. D., Morais, Y. C. B.; Moura, M. S. B.; Jones, C. A. ; Srinivasan, R. 2018. Dry forest deforestation dynamics in Brazil's Pontal basin. *Revista Caatinga*, 31, 385-395.
- Morais, Y. C. B., Araújo, M. S. B., Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D., Miranda, R. Q. 2017. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 585-599,
<https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>
- Neves, L. Z., Mucida, D. P., 2020. Comparação de índices de vegetação entre imagens CBERS, Landsat e Rapideye para área do Cerrado Brasileiro. *Revista Espinhaço UFVJM*, 9, 43-51.
- Oliveira, M. B. L., Santos, A. J. B., Manzi, A. O., Alvalá, R. C. S., Correia, M. F., Moura, M. S. B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 378-386.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A.; Deering, D. W., 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceeding of ERTS-1 Symposium. Anais ... NASA, United States.
- Sampaio, H. S., Bourscheidt, V., Sarracini, L. H., Jorge, L. D. C., Bettiol, G. M., Bernardi, A. D. C., 2020. Comparação entre Índices de Vegetação obtidos por imagens aéreas com Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) e Satélite. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 14, 111-124.
- Sánchez, Y. S., Martínez-Graña, A., Francés, F. S., Picado, M. M., 2018. Mapping wildfire ignition

probability using sentinel 2 and LiDAR (Jerte Valley, Cáceres, Spain). *Sensors*, 18, 826.

Santos, C. V. B., Baptista, G. M. M., Moura, M. S. B., 2017. Seasonality of Vegetation Indices in different land uses in the São Francisco Valley. *Journal of Hiperespectral Remote Sensing*, 7, 158-167.

Santos, C. V. B., Carvalho, H. F. S., Silva, M. J., Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., 2020. Uso de Sensoriamento Remoto na análise da Temperatura da Superfície em áreas de Floresta Tropical Sazonalmente Seca. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 941-953.

Shiroma, G. M., Gamarra, R. M., Guirra, A. P. M., Motta, J. S., de Figueiredo, H. R., Encina, C. C. C., Paranhos Filho, A. C., 2020. Comparação entre Índices de Vegetação de Diferentes Sensores na Identificação de Fitofisionomias do Cerrado. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43, 18-32.

Soares, G., Galvêncio, J. 2020. Uso do Lidar para avaliar os padrões hídricos de bacias em áreas urbanas: Caracterização fisiográfica da bacia do Rio Beberibe, PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 3659-3674. Disponível: doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3659-3674

Tagliarini, F. S. N., 2020. Imagens de Drone e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para Classificação Segmentada em Área de Preservação Permanente (APP). Tese (Doutorado). Botucatu, UNESP.

Material Suplementar (MS)

Material Suplementar 1 (MS1) - Aspecto da floresta no dia da realização do voo com VANT (06/12/2019).



Silva Junior, U. J., Gonçalves, R. M., Oliveira, L. M. M., Silva Junior, J. A., 2021. Sensibilidade Espectral dos Índices de Vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II-PE, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73, 17-35.

Souza, L. S. B. D., Moura, M. S. B. D., Sediya, G. C., Silva, T. G. F. D., 2015. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50, 627-636.

Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sediya, G. C., Silva, T. G. F., 2015. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 41-55.

Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sediya, G. C., Silva, T. G. F., 2017. Carbon exchange in a caatinga area during an unusually drought year. *Agrometeoros*, 25, 37-45.

Souza, G. F., Gutierrez, L. A. R., Barbassa, A. P., Pereira, L. E., Cândido, A. K. A. A., Júnior, J. M., Paranhos Filho, A. C., 2016. Uso de Diferentes Sensores de Satélite na Discriminação de Alvos Naturais. *Anuário do Instituto de Geociências*, 39, 13-22.

Material Suplementar 2 (MS2) - Valores médios de NDVI em cada delimitação de área do pixel do sensor OLI (Landsat 8) para a imagem obtida em câmera Mapir Survey 3 acoplada ao VANT:

Pixel	NDVI	
	VANT Mapir Survey 3	Landsat 8 Sensor OLI
1	0,050	0,365
2	0,050	0,349
3	0,053	0,360
4	0,054	0,360
5	0,057	0,379
6	0,054	0,368
7	0,050	0,355
8	0,048	0,361
9	0,050	0,360
10	0,064	0,367
11	0,065	0,395
12	0,055	0,408
13	0,054	0,379
14	0,049	0,348
15	0,054	0,357
16	0,064	0,402
17	0,065	0,437
18	0,057	0,418
19	0,061	0,361
20	0,057	0,377

Material Suplementar 3(MS3) - Valores médios de NDVI em cada delimitação de área do pixel do sensor MSI (Sentinel 2) para a imagem obtida em câmera Mapir Survey 3 acoplada ao VANT:

Pixel	NDVI	
	VANT Mapir Survey 3	Sentinel 2 Sensor MSI
1	0,07	0,17
2	0,04	0,18
3	0,05	0,19
4	0,04	0,17
5	0,05	0,18
6	0,06	0,20
7	0,06	0,22
8	0,05	0,22
9	0,05	0,22
10	0,05	0,20
11	0,06	0,20
12	0,06	0,21
13	0,05	0,20
14	0,05	0,19
15	0,05	0,20
16	0,06	0,21
17	0,06	0,22
18	0,06	0,20
19	0,05	0,18
20	0,05	0,21
21	0,06	0,21
22	0,06	0,20
23	0,05	0,21
24	0,05	0,19
25	0,05	0,19
26	0,06	0,20
27	0,06	0,21
28	0,06	0,20
29	0,06	0,20
30	0,05	0,19
31	0,05	0,18
32	0,05	0,18
33	0,04	0,18
34	0,06	0,22
35	0,06	0,21
36	0,05	0,19
37	0,05	0,19
38	0,04	0,17
39	0,05	0,18
40	0,05	0,20
41	0,06	0,20
42	0,06	0,20
43	0,05	0,18
44	0,04	0,19
45	0,05	0,19
46	0,05	0,19
47	0,05	0,19
48	0,06	0,22
49	0,06	0,21
50	0,05	0,18
51	0,04	0,16
52	0,05	0,16
53	0,06	0,19
54	0,06	0,20
55	0,06	0,21
56	0,06	0,20
57	0,05	0,19
58	0,06	0,19
59	0,05	0,19
60	0,05	0,19
61	0,06	0,20
62	0,05	0,23
63	0,06	0,20
64	0,05	0,18
65	0,05	0,16
66	0,05	0,17
67	0,05	0,19
68	0,05	0,19
69	0,05	0,19
70	0,05	0,21
71	0,07	0,22
72	0,06	0,22
73	0,06	0,20
74	0,06	0,20
75	0,06	0,20
76	0,06	0,20
77	0,06	0,21
78	0,05	0,18
79	0,05	0,19
80	0,07	0,21
81	0,05	0,17
82	0,04	0,15
83	0,05	0,19
84	0,06	0,19
85	0,05	0,21
86	0,07	0,25
87	0,07	0,25
88	0,06	0,22
89	0,06	0,19
90	0,05	0,20
91	0,06	0,20
92	0,05	0,18
93	0,05	0,19
94	0,05	0,18
95	0,04	0,15
96	0,05	0,17
97	0,05	0,19
98	0,05	0,18
99	0,06	0,26
100	0,06	0,28
101	0,06	0,26
102	0,06	0,22
103	0,05	0,18
104	0,05	0,21
105	0,06	0,23
106	0,07	0,19

107	0,05	0,16	140	0,05	0,19
108	0,04	0,16	141	0,05	0,20
109	0,05	0,17	142	0,05	0,20
110	0,05	0,19	143	0,05	0,21
111	0,05	0,18	144	0,06	0,22
112	0,05	0,19	145	0,07	0,22
113	0,07	0,26	146	0,07	0,25
114	0,08	0,26	147	0,07	0,23
115	0,07	0,25	148	0,05	0,19
116	0,06	0,21	149	0,06	0,22
117	0,05	0,20	150	0,05	0,20
118	0,07	0,21	151	0,05	0,18
119	0,05	0,19	152	0,07	0,24
120	0,05	0,18	153	0,06	0,23
121	0,05	0,18	154	0,06	0,24
122	0,06	0,19	155	0,06	0,20
123	0,06	0,18	156	0,06	0,20
124	0,05	0,19	157	0,06	0,18
125	0,06	0,19	158	0,05	0,18
126	0,05	0,19	159	0,05	0,18
127	0,07	0,23	160	0,06	0,24
128	0,06	0,23	161	0,07	0,23
129	0,08	0,25	162	0,06	0,21
130	0,06	0,23	163	0,06	0,24
131	0,07	0,22	164	0,07	0,25
132	0,07	0,23	165	0,06	0,20
133	0,07	0,21	166	0,08	0,25
134	0,05	0,18	167	0,08	0,24
135	0,05	0,18	168	0,06	0,25
136	0,06	0,18			
137	0,05	0,18			
138	0,07	0,21			
139	0,06	0,20			
