

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DERIVADOS DE BANDAS ESPECTRAIS NO MONITORAMENTO DE ÁREAS EM RESTAURAÇÃO AMBIENTAL COM O SENSOR PARROT SEQUOIA

VEGETATION INDICES DERIVED FROM SPECTRAL BANDS FOR MONITORING ENVIRONMENTAL RESTORATION AREAS USING THE PARROT SEQUOIA

Silvana Lima dos SANTOS¹, Joelson Gonçalves PEREIRA², Sidnei Eduardo LIMA-JUNIOR³, Etenaldo Felipe SANTIAGO³, Marcelo LIMONT⁴, Adriano Chaves FRANÇA⁵

¹Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. E-mail: sillima_sil@hotmail.com

²Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais. Rodovia Dourados - Itahum, km 12. Cidade Universitária. Dourados - MS E-mail: joelsonpereira@ufgd.edu.br

³Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Centro de Estudos em Recursos Naturais. Rodovia Dourados - Itahum, km 12. Cidade Universitária. Dourados - MS. E-mails: selimajunior@hotmail.com; felipe@uem.br

⁴Universidade Positivo, Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental. Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5.300. Curitiba - PR. E-mail: marcelo.limont@up.edu.br

⁵Universidade Federal da Grande Dourados, Grupo de Pesquisa Território e Ambiente. Rodovia Dourados - Itahum, km 12. Cidade Universitária. Dourados – MS. E-mail: adriano@gebio.org.br

Introdução
Material e métodos
Resultados
Discussão
Conclusão
Agradecimentos
Referências

RESUMO - O sensoriamento remoto realizado por sensores acoplados a Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) constitui uma alternativa eficaz em relação aos satélites orbitais. Objetivou-se analisar os índices de vegetação NDVI, NDRE, MCARI, GNDVI e SIPI, calculados a partir das bandas espectrais obtidas por sensor multispectral Parrot Sequoia, de uma área de Preservação Permanente em processo de restauração florestal ao longo de um ano e meio (abril de 2021 a outubro de 2022). A RPA utilizada foi o modelo DJI Phantom 4 Pro, acoplado a um sistema de varredura multispectral Parrot Sequoia. O processamento das imagens foi realizado no software Pix4Dmapper, a partir do qual foram gerados os índices de vegetação (IVs). Embora as análises estatísticas do período não tenham indicado diferenças temporais significativas, alguns índices ilustraram melhor a dinâmica das transformações ocorridas no local. O NDVI, por exemplo, permitiu identificar um comportamento típico da vegetação do Cerrado, com valores próximos a 1 nos dois períodos analisados, representando áreas com alta atividade vegetativa. Por outro lado, os índices SIPI e NDRE apresentaram saturação nas imagens, dificultando a distinção entre vegetação e solo exposto. Os IVs mostraram-se úteis para detectar visualmente variações na cobertura do solo e alterações na estrutura da vegetação decorrentes do seu crescimento.

PALAVRAS-CHAVE: Índices de vegetação. Restauração ambiental. Sensor multispectral.

ABSTRACT - Remote sensing performed by sensors attached to Remotely Piloted Aircrafts (RPAs) represents an effective alternative compared to orbital satellites. This study aimed to analyze, among the vegetation indices NDVI, NDRE, MCARI, GNDVI, and SIPI, obtained through the Parrot Sequoia multispectral sensor, which best represented the evolution of vegetation cover in a Permanent Preservation Area undergoing forest restoration over a period of one and a half years (April 2021 to October 2022). The RPA used was the DJI Phantom 4 Pro, equipped with a Parrot Sequoia multispectral scanning system. Image processing was carried out using Pix4Dmapper software, from which vegetation indices (VIs) were generated. Although statistical analyses did not indicate significant temporal differences, some indices better illustrated the dynamics of transformations in the area. NDVI, for instance, allowed the identification of typical Cerrado vegetation behavior, with values close to 1 in both analyzed periods, indicating areas with high vegetative activity. On the other hand, SIPI and NDRE indices showed saturation in the images, making it difficult to distinguish vegetation from exposed soil. The vegetation indicators proved useful for visually detecting variations in soil cover and changes in vegetation structure due to its growth.

Keywords: Vegetation index. Multispectral sensor. Forest restoration.

INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), instituiu a Década da Restauração de Ecossistemas, vigente de 2021 a 2030. Áreas de proteção ambiental são fundamentais para a

manutenção dos recursos hídricos e da biodiversidade. Assim, restaurar e proteger esses ecossistemas tornou-se uma necessidade urgente, e o uso de tecnologias pode contribuir significativamente para superar esse desafio.

O sensoriamento remoto, realizado por meio de sensores acoplados a Aeronaves Remotamente

Pilotadas (RPAs), tornou-se uma ferramenta eficaz para a detecção da vegetação, devido à alta resolução das imagens obtidas. Essas imagens podem ser utilizadas tanto no monitoramento do desmatamento quanto na avaliação da restauração de áreas florestais. As RPAs oferecem alternativas inovadoras com grande potencial para estudos de sensoriamento remoto (Taylor-Zavala et al., 2021; Xue et al., 2017), apresentando vantagens em relação aos sensores orbitais, como flexibilidade de uso ao longo do tempo e capacidade de transportar câmeras multiespectrais, frequentemente utilizadas para monitorar a saúde da vegetação na agricultura (Kopacková-Strnadová et al., 2021).

O uso desses equipamentos permite a aquisição de imagens com alta resolução espacial, possibilitando a visualização detalhada das feições. Um exemplo é o sensor Parrot Sequoia, que possui quatro sensores de alta acurácia (vermelho, verde, borda vermelha e infravermelho próximo), além de um sensor RGB de 16 megapixels, autocalibrado por meio de um sensor solar integrado à câmera, que realiza a calibração

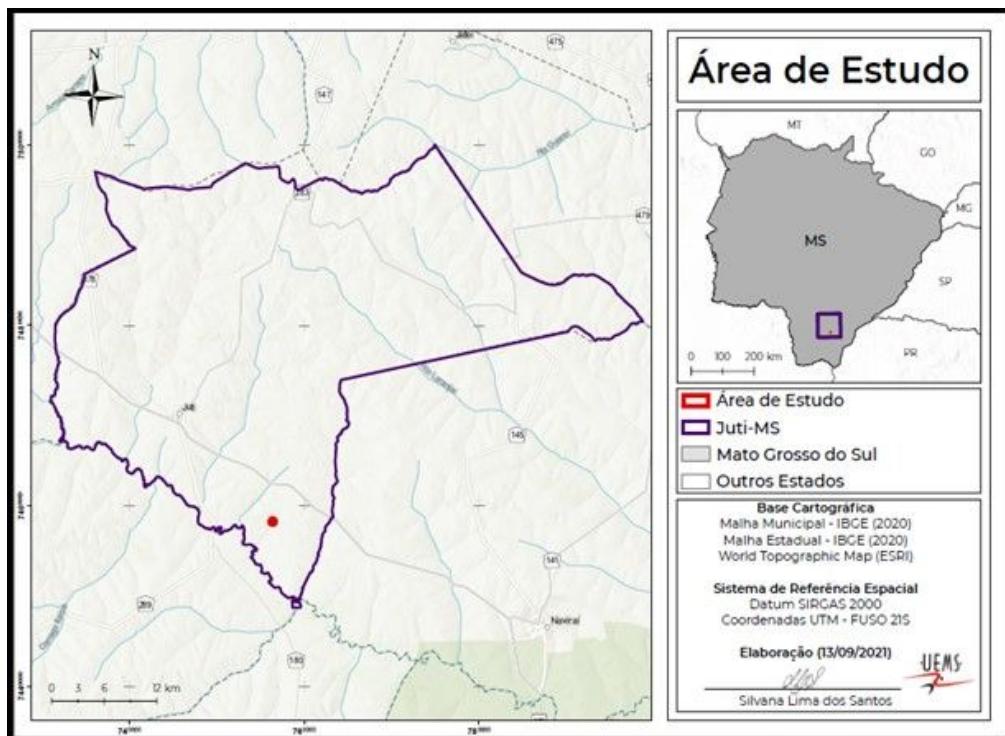
radiométrica em tempo real, resultando em análises mais precisas. As bandas capturadas na faixa do infravermelho próximo são essenciais para estudos relacionados à vegetação, pois refletem o teor de clorofila das plantas. A borda vermelha é comumente utilizada para detectar o estresse da vegetação (Rock et al., 1988; Kopacková-Strnadová et al., 2021). Os espectros de reflectância foliar são determinados por características químicas e morfológicas da superfície das folhas (Xue et al., 2017). As informações obtidas por meio das bandas espectrais permitem o cálculo de diversos mapas de índices de vegetação, utilizados em algoritmos computacionais (Parrot, 2017).

Portanto, objetivou-se analisar, entre os índices de vegetação NDVI, NDRE, MCARI, GNDVI e SIPI, calculados a partir das bandas espectrais obtidos do pelo sensor multiespectral Parrot Sequoia, aquele que melhor representou a evolução da cobertura vegetal de uma área de Preservação Permanente em processo de restauração ambiental ao longo de um ano e meio (abril de 2021 a outubro de 2022).

MATERIAL E METODOS

A aquisição das imagens aerofotogramétricas ocorreu em uma Área de Preservação Permanente (APP) do córrego Cerrado Feio, localizada na propriedade rural denominada Fazenda Janaina, cujas coordenadas são: 22°57'0.99" S e

54°29'48.18" O, no município de Juti – MS (Figura 1). No local, foram realizadas diversas ações de restauração florestal, como melhoria do solo e plantio de espécies arbóreas nativas da região.



A propriedade está situada em uma região de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, apresentando fitofisionomias típicas de áreas de cerradão, floresta estacional semidecidual, mata ciliar e floresta plantada (eucalipto). O local de estudo está inserido na bacia hidrográfica do Rio Paraná e sub-bacia do Rio Amambai, o córrego Cerrado Feio (Figura 1), é um importante afluente do Rio Amambai. O relevo da propriedade é plano a suavemente ondulado, e as principais atividades econômicas consistem na pecuária e lavoura.

O histórico de uso da área é marcado pela atividade agropecuária, e pela retirada da cobertura florestal nativa nos últimos 40 anos. A vegetação exótica é representada por pastagens com gramíneas do gênero *Brachiaria spp.*, e talhões de *Eucalyptus spp.* nos limites da APP. Destacam-se também os danos causados pelo acesso do gado para dessedentação, áreas de solo exposto e compactado, erosão laminar e em sulcos, além de trechos sem horizonte superficial do solo, expondo a rocha matriz.

Além dos problemas erosivos, o local apresenta declividade de até cinco metros entre o ponto mais alto (limites da Reserva Legal) e o mais baixo (margens do córrego). Essa característica, somada ao histórico de uso e às condições físicas do solo, contribui para o passivo ambiental observado. Antes das ações de restauração, a área encontrava-se severamente degradada devido ao pastoreio livre prolongado.

As condições de degradação refletem a pressão antrópica da atividade produtiva, favorecendo a perda de solo, processos erosivos, lixiviação de nutrientes e redução da biodiversidade local.

As ações de restauração na área tiveram início em novembro de 2019, e a aquisição dos dados aerofotogramétricos foi realizada em abril de 2021 (09h05, GSD: 6,78 cm/pixel), março de 2022 (15h46, GSD: 6,39 cm/pixel) e outubro de 2022 (15h11, GSD: 5,88 cm/pixel), com 80% de sobreposição ao longo da rota, a uma altitude de 40 m.

Os voos duraram entre 3 e 5 minutos, sob boas condições de iluminação solar. Os dados de GPS do DJI Phantom 4 Pro e do sensor *Parrot Sequoia* foram utilizados para referenciar os ortomosaicos no sistema de coordenadas WGS 84/UTM – 21S. As imagens (RGB e multiespectrais) foram processadas no software Pix4Dmapper, permitindo a geração de ortomosaicos, modelos digitais de superfície (MDS) e índices de vegetação. Foi utilizado o ARP DJI Phantom 4 Pro, um quadri-

cóptero amplamente empregado, com peso de 1.388 g e câmera RGB em 4K (4096 × 2160 pixels). O sistema foi complementado com o sensor multiespectral *Parrot Sequoia* (*senseFly Inc.*). A adaptação do sensor ao RPA foi feita com suporte impresso em 3D, desenvolvido especificamente para esse modelo.

O sensor Sequoia foi configurado para exposição automática. Os pixels da câmera possuem resolução radiométrica de 8 ou 10 bits, conforme a configuração escolhida, enquanto o sensor de irradiância captura em 16 bits, com nove leituras por imagem (Parrot Drones, 2017; Adler, 2018).

As imagens são calibradas radiometricamente em tempo real por meio de um sensor solar integrado à câmera. Antes de cada voo, foi realizada a calibração radiométrica com o painel de refletância fornecido pelo fabricante, que possui valores conhecidos para todo o espectro visível e infravermelho próximo.

O processamento das imagens foi realizado no software Pix4Dmapper (versão 4.8.1). As imagens multiespectrais e RGB foram processadas separadamente. Para as multiespectrais, o fluxo incluiu: (1) inserção das bandas *green*, *red edge*, *red* e *nir*; (2) inserção das imagens de calibração; (3) geração de nuvem de pontos, ortomosaicos, mapas de refletância e MDS; e (4) cálculo dos índices de vegetação (IVs) pelo próprio software. O processamento das imagens RGB seguiu o mesmo fluxo, exceto pela ausência da etapa de calibração.

Após o processamento, os dados foram tratados no software QGIS (versão 3.28.2) para aprimorar a apresentação dos resultados. As equações utilizadas para o cálculo dos índices estão apresentadas na tabela 1.

Os índices de vegetação foram formados a partir da composição de diferentes bandas, e neste estudo foram utilizadas as bandas *green*, *red*, *red edge* e *nir*, que podem ser observadas separadamente na Figura 2. Cada uma dessas bandas é capaz de fornecer informações por meio das imagens obtidas (pixel) sobre a refletância da cobertura vegetal do local.

Os valores dos índices obtidos para os períodos de abril de 2021 e outubro de 2022 foram comparados por meio do teste *t*, utilizando o software *Statistica* 14 (TIBCO, 2020), com o objetivo de verificar diferenças significativas entre os anos. As imagens *raster* geradas foram submetidas ao plugin AcATAma do QGIS para validação dos resultados.

O plugin AcATAma permite confirmar e

validar dados de uso e cobertura do solo por meio de matriz de confusão, sendo um estimador estratificado que calcula a acurácia geral de uma imagem temática (Acatama, 2019). Neste estudo,

os ortomosaicos dos períodos analisados (04/2021, 03/2022 e 10/2022) foram utilizados para validar os resultados dos índices de vegetação quanto à acurácia da cobertura do solo.

Tabela 1 - Índices e suas respectivas equações. *Nir*: Refletância na faixa do infravermelho próximo; *Green*: refletância na faixa do verde; *Red*: refletância na faixa do vermelho; *Red edge*: refletância na faixa de transição do vermelho.

$NDVI = (nir - red) / (nir + red)$	Índice de vegetação pela diferença normalizada.
$NDRE = (nir - red edge) / (nir + red edge)$	Índice de vegetação pela diferença normalizada a transição do vermelho (<i>red edge</i>).
$MCARI = 1.2 * (2.5 * (nir - red) - 1.3 * (nir - green)) / (normalized to the maximum value of red, green, and nir bands)$	Índice de refletância de absorção de clorofila modificado.
$GNDVI = (nir - green) / (nir + green)$	Índice de vegetação pela diferença normalizada ao verde.
$SIPI = (nir - green) / (nir - red)$	Índice de vegetação ajustado pela presença do solo.

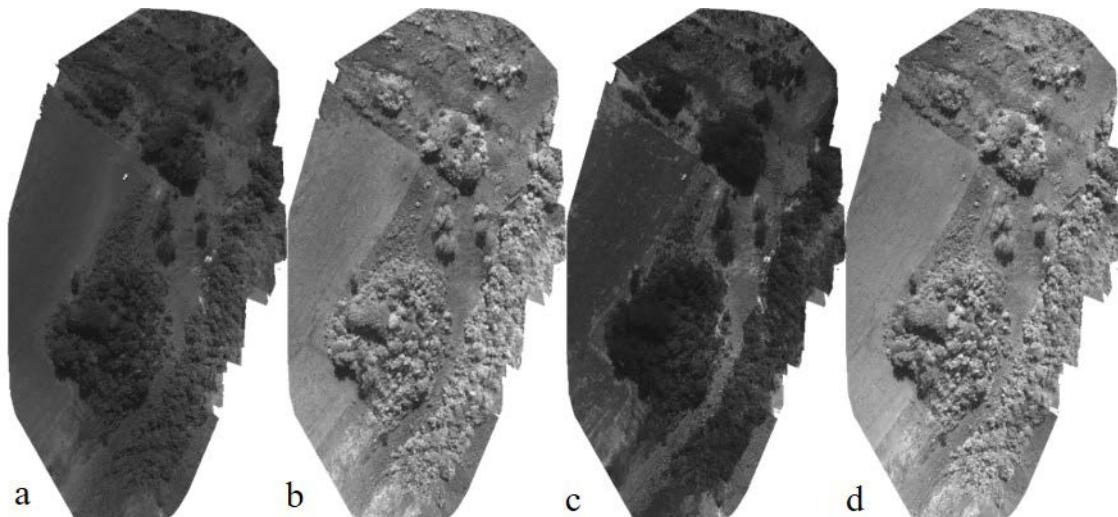


Figura 2 - Ortomosaicos gerados no software Pix4D a partir das bandas captadas pelo sensor *Parrot Sequoia*: (a) *green*, (b) *red edge*, (c) *red* e (d) *near infrared*.

RESULTADOS

Nos produtos gerados a partir das imagens de abril de 2021, o ortomosaico (Figura 3A) permite observar as áreas cobertas por vegetação e os locais com solo exposto. Em relação aos índices de vegetação, alguns apresentaram resultados mais eficazes que outros.

O SIPI (Figura 3B) destacou as áreas de solo exposto em verde-escuro, enquanto os locais com vegetação apareceram em tons de verde e amarelo. O NDRE (Figura 3C) apresentou uma imagem saturada, com tons de amarelo e vermelho, dificultando a distinção entre vegetação e solo. O MCARI (Figura 3D) mostrou a vegetação em tons de amarelo e verde, e o solo exposto em vermelho-escuro. Em contraste, tanto o NDVI quanto o GNDVI (Figuras 3E, F) exibiram a vegetação em verde e o solo em vermelho. O NDVI, quando comparado à imagem real do local (ortofoto RGB), demonstrou com maior clareza os locais onde a vegetação plantada se desenvolveu e onde o solo

permaneceu exposto.

Nos produtos gerados a partir das imagens de março de 2022, o ortomosaico (Figura 4A) evidencia os locais onde foram plantadas mudas de árvores nativas que, possivelmente, não se desenvolveram, pois, o coroamento aparece sem vegetação e com solo exposto. O índice SIPI (Figura 4B) apresentou tons de verde, com o solo exposto representado em verde escuro e a vegetação em verde mais claro, embora a distinção entre esses elementos seja difícil de interpretar. O NDRE (Figura 4C) mostrou a vegetação em diferentes tons de verde, sendo que as áreas mais desenvolvidas aparecem em verde escuro.

O MCARI (Figura 4D) exibiu o solo exposto em vermelho e a vegetação em tons de amarelo e verde. Os índices NDVI e GNDVI (Figuras 4E, F) representaram o solo exposto em cores que variam entre amarelo e vermelho, enquanto a vegetação foi exibida em verde.

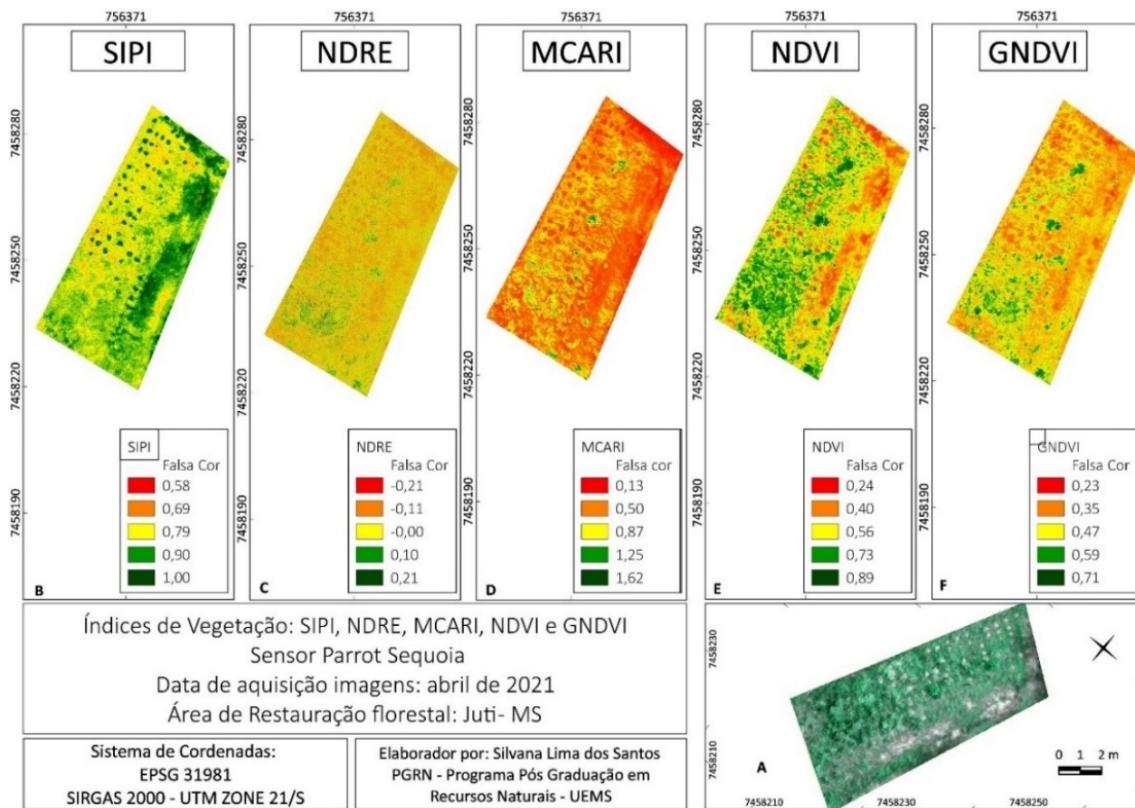


Figura 3 - Dados cartográficos gerados por meio de aerofotogrametria, utilizando sensor *Parrot Sequoia* - 04/2021. Ortomosaico (A), SIPI (B), NDRE (C), MCARI (D), NDVI (E) e GNDVI (F).

Nos indicadores gerados a partir das imagens de outubro de 2022, o ortomosaico (Figura 5A) revela as áreas cobertas por vegetação, embora não seja possível distinguir com clareza entre vegetação nativa e gramíneas exóticas

(*Brachiaria* spp.), além de identificar os locais com solo exposto. O índice SIPI (Figura 5B) apresenta uma imagem saturada em tom de verde escuro, dificultando a distinção entre vegetação e solo.

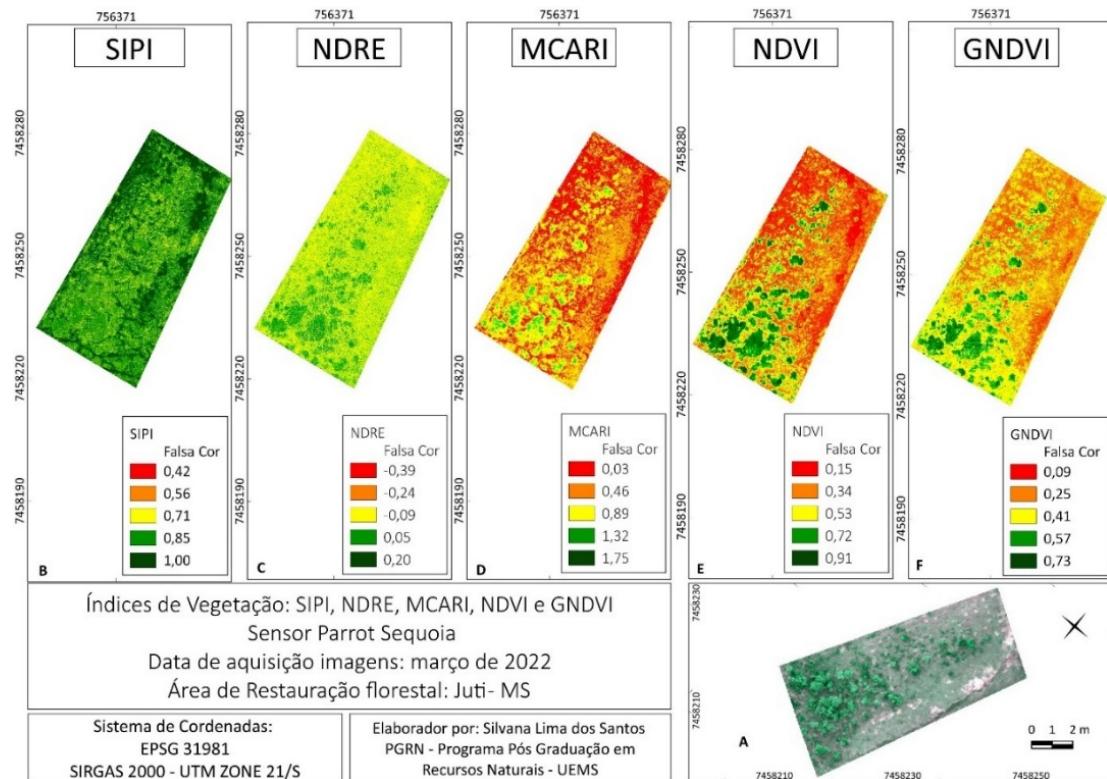


Figura 4 - Dados cartográficos gerados por meio de fotogrametria, utilizando sensor *Parrot Sequoia* 03/2022. Ortomosaico (A), SIPI2 (B), NDRE (C), MCARI (D), NDVI e (F) GNDVI.

O NDRE (Figura 5C) exibiu uma mistura de tons de vermelho e verde, tornando difícil interpretar o que ocorre na área. O MCARI (Figura 5D) apresentou as áreas em laranja e

vermelho. O NDVI (Figura 5E) destacou o solo exposto em vermelho e a vegetação em verde escuro. O GNDVI (Figura 5F) mostrou o solo em amarelo e a vegetação em verde escuro.

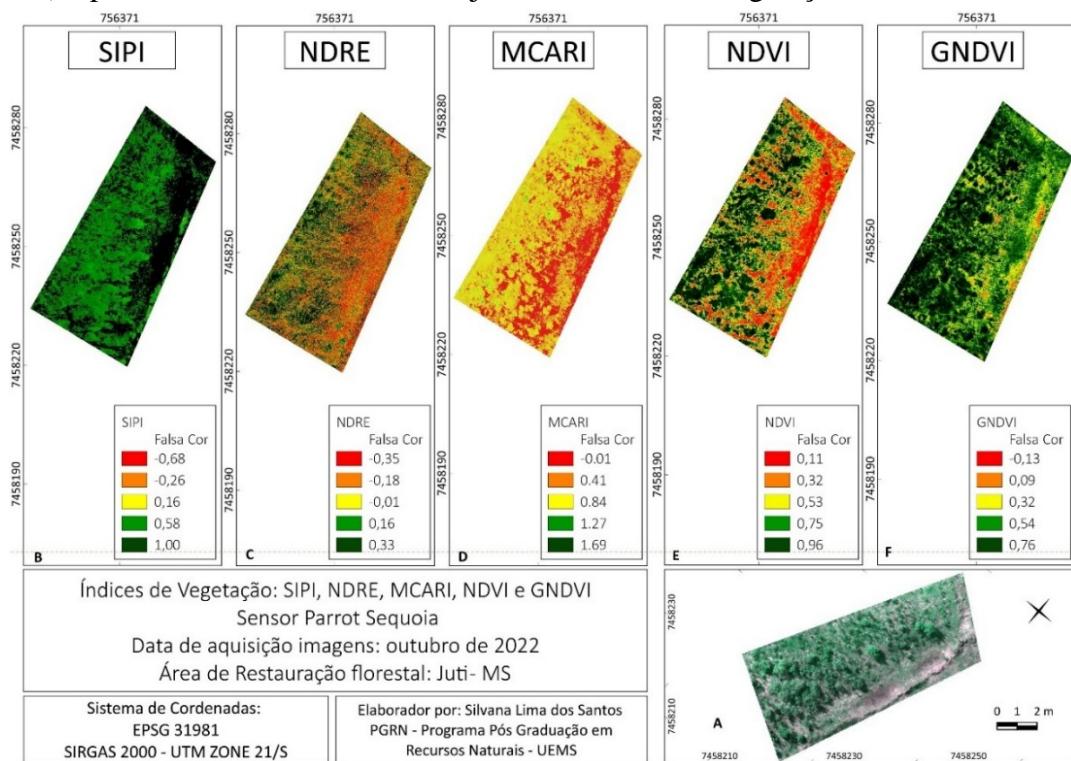


Figura 5 - Dados cartográficos gerados por meio de fotogrametria, utilizando sensor Parrot Sequoia 10/2022 Ortomosaico (A), SIPI2 (B), NDRE (C), MCARI (D), NDVI (E) e GNDVI (F).

Os índices de vegetação (IVs) analisados apresentaram diferenças significativas entre os períodos de abril de 2021 e outubro de 2022

(Figura 6). Contudo, as análises estatísticas não indicaram diferenças significativas entre os índices obtidos nos dois períodos ($p > 0,05$).

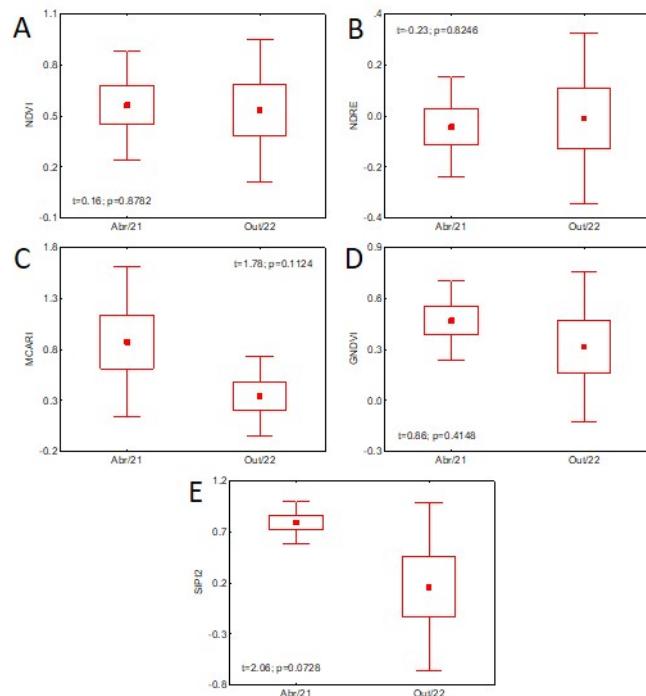


Figura 6. Médias (quadrados), erros padrão (caixas retangulares) e intervalos de confiança (barras verticais) dos índices de vegetação: (A) NDVI, (B) NDRE, (C) MCARI, (D) GNDVI e F) SIPI, obtidos a partir das imagens aerofotogramétricas realizadas em abril de 2021 e outubro de 2022.

Os resultados da classificação supervisionada realizada por meio do *plugin* AcATaMa no *software* QGIS, com o objetivo de validar os dados obtidos nos índices de vegetação, indi-

caram que o índice NDVI foi o que apresentou maior acurácia em relação aos dados verificados para os IVs nos três períodos analisados (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de acurácia geral dos índices de vegetação, obtidos após análises realizadas no software QGIS (versão 3.28.3), utilizando o *plugin* AcATaMa (*Accuracy Assessment of Thematic Maps*), onde se lê os resultados da validação dos dados gerados pelos índices NDVI, NDRE, MCARI, GNDVI e SIPI nos três períodos analisados.

IVs Índices	abril/21		mar/22		out/22	
	P. G.	D. P.	P. G.	D. P.	P. G.	D. P.
GNDVI	0.70554	0	0.80222	0.06472	0.41324	0
MCARI	0.74520	0	0.37575	0.08617	0.6359	0.07450
NDRE	0.41741	0.06933	0.27685	0	0.45529	0
NDVI	0.74690	0.06705	0.83900	0.05679	0.67736	0.05983
SIPI	0.34687	0	0.29755	0	0.00133	0

*P.G.: Precisão Geral * D. P.: Desvio Padrão.

DISCUSSÃO

Embora os resultados não tenham apresentado diferenças estatísticas significativas nas médias obtidas ao comparar os valores gerados pelos índices em 2021 e 2022, os índices de vegetação mostraram-se eficazes para detectar visualmente variações na cobertura do solo e alterações na estrutura da vegetação decorrentes do processo de restauração. Essa abordagem é corroborada por estudos como o de Silva et al. (2020), que destacam o papel dos índices espectrais na identificação de padrões de regeneração em áreas degradadas.

Destaca-se o índice NDVI, que, em comparação com os demais, demonstrou com maior fidelidade na representação das modificações na dinâmica da vegetação. Essa superioridade foi evidenciada pela menor variação tonal nas imagens processadas, indicando maior estabilidade na resposta espectral. A aplicação do *plugin* AcATaMa no software QGIS, corroborou essa constatação, ao gerar valores mais precisos para o NDVI em comparação aos demais índices.

De acordo com Ribeiro et al. (2021), o NDVI é amplamente empregado em projetos de restauração ecológica devido à sua elevada sensibilidade à biomassa verde e à facilidade de interpretação dos dados. Complementarmente, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023) aponta o NDVI como o índice com maior compatibilidade para discriminar diferentes fitofisionomias em áreas degradadas, reforçando sua relevância em estudos de monitoramento ambiental e recuperação de ecossistemas.

Ao analisarmos os recortes da área de estudo, observou-se que alguns índices expressaram de forma mais realista a condição da vegetação,

permitindo identificar locais com espécies herbáceas nativas, predominância de gramíneas exóticas do tipo *Brachiaria* em diferentes estágios de desenvolvimento, além de áreas com solo exposto. Essa capacidade de discriminação é essencial em áreas de restauração, como apontado por Guijarro et al. (2015), que ressaltam os desafios da segmentação automática em ambientes heterogêneos.

O GNDVI, uma modificação do NDVI, que substitui o VIS verde pelo VIS vermelho, demonstrou maior precisão na detecção de conteúdo de clorofila, sendo útil para identificar vegetação em senescência. O MCARI também evidenciou mudanças significativas, por ser sensível à profundidade de absorção de clorofila e ao índice de área foliar, conforme descrito por Auravant (2024).

Por outro lado, os índices SIPI e NDRE apresentaram saturação nos produtos gerados, dificultando a diferenciação entre vegetação e solo exposto. O SIPI, recomendado para vegetação com estrutura variável do dossel, mostrou-se inadequado para a vegetação baixa da área estudada. O NDRE, embora ofereça uma visão abrangente da presença de vegetação, apresentou imprecisões na análise pelo AcATaMa, possivelmente devido à baixa densidade foliar e à interferência de fatores atmosféricos.

Todos os índices aplicados utilizam fórmulas matemáticas para aumentar a diferenciação entre pixels de vegetação e de solo, mas sua eficácia depende das condições ambientais e da estrutura da vegetação. Como os sistemas de imagem operam em ambientes externos não estruturados, os processos de segmentação tornam-se desafia-

dores, especialmente em áreas com vegetação esparsa ou solo exposto (SUH et al., 2020).

Além disso, as imagens aerofotogramétricas analisadas apresentaram variações quanto ao horário de aquisição e à estação do ano, influenciando a resposta espectral da vegetação. A vegetação responde de forma distinta às condições sazonais, afetando a produção de biomassa verde e, consequentemente, os valores dos índices espectrais. Estudos como o de Zarco-Tejada et al. (2013) reforçam que fatores como horário de voo, ângulo solar e cobertura de nuvens impactam diretamente a refletância captada pelos sensores.

Portanto, embora os índices espectrais tenham limitações, sua aplicação em conjunto com ferramentas de geoprocessamento e conhecimento ecológico local permite uma avaliação mais precisa da evolução da vegetação em áreas em restauração. Recomenda-se, para estudos futuros, a integração de dados multitemporais com sensores orbitais e a validação em campo para aumentar a confiabilidade dos resultados.

Embora algumas cores da paleta sejam mais frequentemente utilizadas, diferentes *softwares*

de processamento oferecem flexibilidade na alteração dessas cores, permitindo ao operador modificar tons, contraste e outros parâmetros para melhor destacar os aspectos desejados. As imagens aerofotogramétricas analisadas apresentam diferenças quanto ao horário de aquisição e à estação do ano. As imagens de abril de 2021 foram obtidas pela manhã (09h00), no outono; as de março de 2022, à tarde (15h46), também no outono; e as de outubro de 2022, à tarde (15h11), na primavera. A vegetação responde de maneira distinta às condições sazonais, influenciando a produção de biomassa verde.

Assim, os produtos do processamento, especialmente os índices de vegetação, podem apresentar diferenças visuais relacionadas às condições de luz no momento da captura, como refletância de nuvens, horário do dia e softwares utilizados. As condições atmosféricas e de iluminação mudam ao longo do dia, sendo importante considerar que a quantidade de luz pode variar significativamente entre imagens, resultando em sombreamentos em imagens capturadas no final da tarde e em cores mais brilhantes em dias ensolarados (Guíjarro et al., 2015).

CONCLUSÃO

A evolução da dinâmica da vegetação na área em restauração ambiental evolui de forma gradual, o intervalo de pouco mais de um ano não se mostrou suficiente para que os índices de vegetação (IVs) apresentassem variações estatisticamente significativas. Ainda assim, os dados obtidos evidenciam o potencial dos IVs para monitorar alterações sutis na cobertura vegetal.

Entre os índices analisados, O NDVI destacou-se como o mais representativo da evolução da vegetação, seguido pelo GNDVI e pelo MCAR, que também demonstram boa sensibilidade às mudanças estruturais e fisiológicas da

vegetação. Por outro lado, o NDRE e o SIPI apresentaram limitações na discriminação entre vegetação e solo exposto, refletindo com menor precisão as condições reais da área estudada.

A aplicação de sensores espectrais embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), aliada ao uso de câmeras multiespectrais, revelou-se uma estratégia promissora para o monitoramento da regeneração vegetal.

Essa abordagem permite uma análise espacial detalhada e contínua, contribuindo para a compreensão dos processos ecológicos envolvidos na restauração e para a tomada de decisões mais assertivas na gestão ambiental.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da UEMS, em especial a secretaria do PGRN pela relação construída ao longo do meu período pelo PGRN.

Ao Programa Institucional de Bolsas aos alunos de Pós-Graduação (PIBAP) da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS).

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior agradeço pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ACATAMA. *QGIS plugin*. Disp. em: <https://plugins.qgis.org/plugins/AcTaMa/>. Acesso em: 25jun2024.
- AURAVANT. *Índices de vegetação e sua interpretação*. Auravant, 2024. Disp. em: <https://www.auravant.com.pt/artigos/agricultura-de-precisao/indices-de-vegetacao-e-sua-interpretacao/>
- DJI. *Site oficial*. Disponível em: <https://www.dji.com>. Acesso em: 25jul.2024.
- FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. *O estado da segurança alimentar e nutricional*

- no Brasil: um retrato multidimensional.** Brasília: FAO, 2014. Disp. em: <https://www.fao.org/brasil/pt/>. Acesso em: 02jan2024.
- GUIJARRO, M.; SÁNCHEZ, J.S.; PÉREZ, J. M. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 12–23, 2015.
- GUIJARRO, N.; PRÉVOT, M. S.; SIVULA, K. *Surface modification of semiconductor photoelectrodes*. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 17, n. 24, p. 15655–15674, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5CP01992C>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Limites políticos, 2019**. Disp. em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Detecção de vegetação em áreas de mineração com índices espectrais**. São José dos Campos: INPE, 2023. Disp. em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.08.18.47/doc/155982.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.
- MICASENSE. **Coleta de dados com sensores MicaSense**. Disp. em: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/224893167-Best-practices-Collecting-Data-with-MicaSense-Sensors>.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração do Rio de 1992**. Disp. em: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CONF.151_26_Vol.I_Declaration.pdf.
- PARROT DRONES SAS. *Parrot Sequoia*. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.parrot.com/en/support/documentation/sequoia>.
- PIX4D. **Pix4Dfields Monthly rental license 1bca414a**. Disp. em: <https://www.pix4d.com/es>. Acesso em: 10marc2024.
- RIBEIRO, A.M.; SILVA, T.F.; COSTA, M.A. Aplicações do índice NDVI no monitoramento de áreas em restauração ecológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 512–528, 2021.
- ROCK, B.N.; HOSHIZAKI, T.; MILLER, J.R. (J.R.). Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 109–127, 1988.
- SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. A.; COSTA, F. L. Aplicação do NDVI na recuperação de áreas degradadas por mineração. **Revista Holos**, v. 36, n. 3, p. 1–12, 2020. Disp. em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/download/12375/8285>.
- SUH, H.; LEE, J.; KIM, D. Vegetation indices for monitoring land restoration. **Remote Sensing**, v. 12, n. 4, p. 1–18, 2020.
- TAYLOR-ZAVALA, R. Quantificando características bioquímicas sobre as florestas subantárticas da Patagônia e sua relação com índices de vegetação multiespectral. **Remote Sensing**, v. 13, p. 4232, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214232>.
- TIBCO SOFTWARE INC. **Data Science Workbench, versão 14, 2020**. Disp. em: <http://tibco.com>. Acesso em: 17mar2024.
- XUE, J.; SU, B. Índices significativos de vegetação de sensoriamento remoto: uma revisão de desenvolvimentos e aplicações. **Journal of Sensors**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
- ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMAD, Y. Remote sensing of vegetation biochemistry using hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 1–15, 2013

Submetido em 8 de outubro de 2025
Aceito para publicação em 10 de novembro de 2025