

Digitalização da Fazenda Experimental Santa Paula: Aplicações de Agricultura de Precisão e Sensoriamento Remoto

Lucas G. M. dos Santos ^(1,*), Lucas S. Santana ⁽²⁾, Carmem L. S. Surmani ⁽³⁾, Josiane M. da Silva ⁽¹⁾, Marcos D. S. Lopes ⁽³⁾, Luana R. Ferreira ⁽³⁾, Tiago S. Costa ⁽³⁾, Ruan C. G. de S. Rodrigues ⁽³⁾, Felype S. Pires ⁽⁴⁾ e Bruno S. Borgens ⁽⁴⁾

¹ Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, UFVJM, Unai/MG

² Professor adjunto, UFVJM, Unai/MG

³ Discente de Engenharia Agrícola e Ambiental, UFVJM, Unai/MG

⁴ Discente de Agronomia, UFVJM, Unai/MG

*E-mail do autor principal: lucas.gabryel@ufvjm.edu.br

RESUMO EXPANDIDO

INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio de conciliar a crescente demanda por alimentos com a necessidade de promover práticas produtivas mais sustentáveis (Laurett et al., 2021). Nesse cenário, a agricultura de precisão tem emergido como um paradigma essencial para a modernização do setor (Mamabolo et al., 2025), permitindo o monitoramento detalhado da variabilidade espacial e temporal das áreas de cultivo e subsidiando a tomada de decisão em nível localizado (Fanelli et al., 2020). Essa abordagem busca otimizar o uso de insumos, aumentar a eficiência operacional e reduzir os impactos ambientais (Vărzaru et al., 2025), constituindo-se como ferramenta estratégica para a competitividade agrícola em escala global (Fusco et al., 2023).

Entre os avanços tecnológicos associados a esse paradigma, destaca-se o sensoriamento remoto, que possibilita a aquisição de dados multiescalares sobre o ambiente agrícola (Zhang et al., 2025). Com o desenvolvimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), tornou-se viável realizar levantamentos de alta resolução espacial e temporal, capazes de gerar informações detalhadas sobre a cobertura vegetal, a condição do solo e as interações entre esses componentes (Santana et al., 2024). A integração desses dados em sistemas digitais permite a elaboração de ortomosaicos, modelos topográficos e índices espectrais, constituindo um conjunto robusto de ferramentas para o manejo inteligente das áreas cultivadas (Liang et al., 2025).

A digitalização de áreas experimentais agrícolas insere-se nesse contexto como um passo estratégico para consolidar práticas de agricultura digital (Abbasi et al., 2022). Ao organizar e

sistematizar informações georreferenciadas de alta resolução, cria-se uma base de dados fundamental, tanto para a gestão produtiva quanto para o desenvolvimento científico e a formação de recursos humanos (Taipalus et al., 2024). Além de possibilitar análises aplicadas ao planejamento agrícola e à conservação dos recursos naturais, esses ambientes digitais oferecem suporte para a validação de metodologias inovadoras em ensino e extensão universitária (Abiri et al., 2023).

A Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), vinculada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), constitui um espaço privilegiado para o desenvolvimento e a validação de ferramentas agrícolas devido ao seu contexto edafoclimático típico do Cerrado brasileiro, região estratégica para a produção nacional. Este estudo propõe a digitalização da FESP, utilizando sensoriamento remoto e análises de dados. A iniciativa não apenas potencializa a função experimental e didática da fazenda, mas visa também estabelecer um paradigma de referência para a adoção de tecnologias digitais em propriedades rurais de características semelhantes, dando suporte direto à agricultura de precisão e a práticas mais sustentáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental Santa Paula (FESP) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Brasil, abrangendo uma área de 133 hectares (296.400 e 297.440 m W e paralelos 8.181.930 e 8.180.710 m S, na projeção UTM zona 23S e datum SIRGAS 2000), no município de Unai, Minas Gerais, Brasil (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima do tipo Aw (Alvares et al., 2013). O solo de Unai é

predominantemente composto por Latossolos Vermelhos Distróficos, típicos, de textura muito argilosa e caulíníficos, encontrados em relevo plano e na fase cerrado tropical subcaducifólio (Naime et al., 2014).

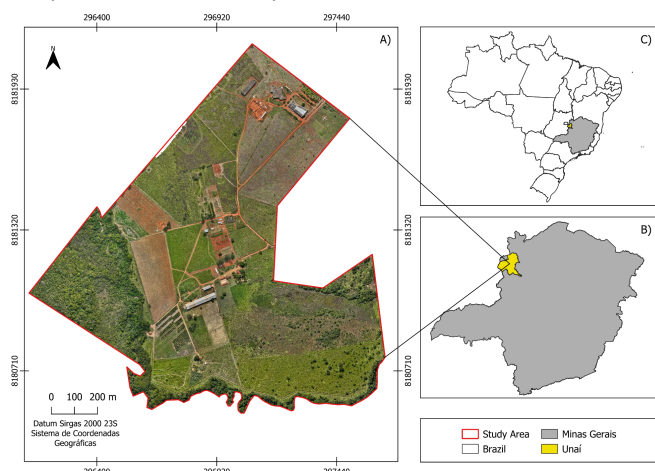


Figura 1 - Mapa da área de estudo. A) Ortomosaico com limite da área em vermelho. B) Uai destacado em Minas Gerais. C) Minas Gerais no contexto do Brasil.

Os dados foram obtidos por meio de sobrevoo utilizando a Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) DJI Mavic 3 Enterprise Multispectral (Figura 2). A ARP é equipada com uma câmera RGB de 20 MP e câmera multiespectral com 4 sensores CMOS de 1/2,8" (5 MP), distância focal de 25 mm e lente com abertura f/2,0 (campo de visão de 73,91°). As bandas espectrais disponíveis são Green (560 nm $\pm$ 16 nm), Red (650 nm $\pm$ 16 nm), RedEdge (730 nm $\pm$ 16 nm) e NIR (860 nm $\pm$ 26 nm), com pixel de 3,3 μ m.



Figura 2 - Equipamentos utilizados: (A) DJI Mavic 3 Enterprise, (B) Estação Móvel DJI D-RTK2.

Os parâmetros de voo configurados para o sobrevoo foram: altura de 120 metros e velocidade de 10,7 m/s, resultando em um Ground Sample Distance (GSD) de 5,54 cm/pixel. A sobreposição das imagens foi configurada em 70% na direção frontal e 70% na lateral. Foram capturadas 1.073 imagens RGB e 4.292 multiespectrais durante o percurso, percorrendo uma trajetória de 34,60 km em uma duração estimada de 56 minutos e 31 segundos.

O processamento fotogramétrico das imagens obtidas pelo drone foi realizado no software Agisoft PhotoScan Professional (versão 1.4.4), onde as imagens foram importadas, alinhadas e utilizadas para a geração da nuvem de pontos densa, do Modelo Digital de Elevação (MDE) e do ortomosaico. Para a obtenção dos mapas de refletância de cada banda espectral, os dados foram processados no Pix4Dmapper (versão 4.5.6). Posteriormente, os índices espectrais e topográficos foram calculados e analisados no ambiente estatístico R, com interface RStudio, possibilitando a geração de mapas temáticos de variabilidade espacial da vegetação e do solo.

Além dos levantamentos espectrais e topográficos, foram utilizados dados meteorológicos provenientes de estação automática instalada na área experimental. Essas informações incluíram variáveis como temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e evapotranspiração de referência (ET_0). Tais parâmetros foram empregados de forma complementar na interpretação dos índices espectrais, possibilitando relacionar o comportamento da vegetação e do solo com as condições atmosféricas vigentes durante o período de aquisição das imagens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices espectrais analisados (Figura 3) evidenciaram padrões consistentes da condição da vegetação no período do sobrevoo.

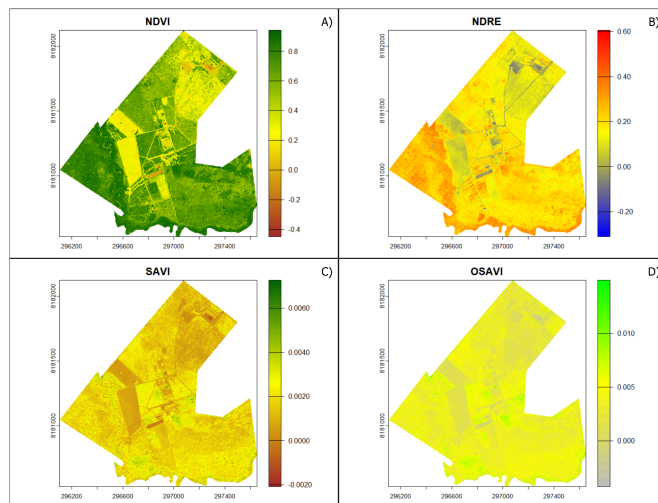


Figura 3 - Índices Espectrais: (A) NDVI - Normalized Difference Vegetation Index; (B) NDRE - Normalized Difference Red Edge; (C) SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index; (D) OSAVI - Optimized Soil Adjusted Vegetation Index.

O NDVI apresentou valor médio de 0,59, caracterizando vegetação com vigor fotossintético moderado a elevado, compatível com a fase de desenvolvimento observada em campo. De forma

complementar, o NDRE (0,18) indicou maior sensibilidade à concentração de clorofila nas folhas, sugerindo que a vegetação mantinha atividade metabólica adequada. Índices de ajuste de solo, como SAVI (0,0017) e OSAVI (0,0035), apresentaram valores próximos de zero, revelando baixa interferência do solo exposto sobre os pixels analisados, o que confirma a predominância de cobertura vegetal ativa na área. Esses resultados corroboram Melnyk & Brunn (2025), que destacaram o papel de análises multi-índices (NDVI, SAVI, NDRE, NDWI) na detecção integrada da condição da vegetação, mostrando que a combinação de índices aumenta a robustez do monitoramento em cenários de variação sazonal.

Os índices relacionados ao estado hídrico da vegetação reforçaram essa interpretação, conforme observado na Figura 4. O NDWI apresentou valor negativo (-0,59), evidenciando baixa retenção de água na copa, o que pode estar associado tanto às condições atmosféricas mais secas quanto ao estágio fenológico da cultura. Em consonância, o índice de clorofila (CI = -0,044) indicou tendência de decréscimo na concentração foliar de pigmentos fotossintéticos, apontando possível início de estresse fisiológico. Já o Brightness Index (BI = 0,0002) mostrou estabilidade na reflectância geral, sem sinal de áreas extensivamente degradadas ou excesso de solo descoberto.

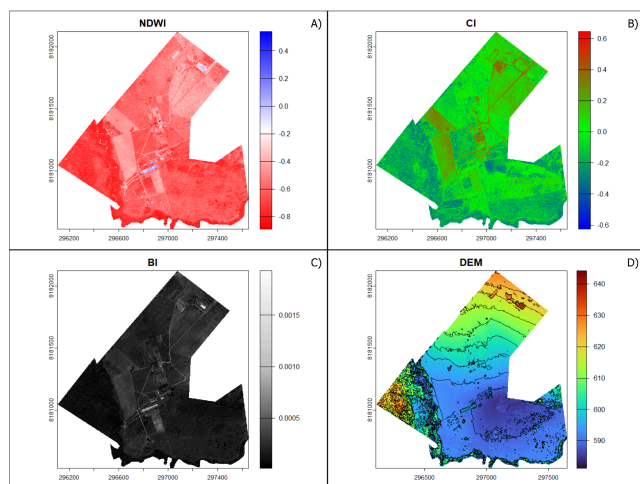


Figura 4 - Índices Espectrais: (A) NDWI - Normalized Difference Water Index; (B) CI - Color Index; (C) BI - Brightness Index; (D) DEM - Digital Elevation Model.

As condições meteorológicas registradas durante o período de aquisição das imagens corroboram os resultados espectrais. A temperatura média foi de 21,7 °C, com máximas de até 31,3 °C e mínimas próximas a 12,6 °C, valores típicos de transição entre outono e inverno. A precipitação acumulada foi reduzida (6,1 mm), e a umidade relativa apresentou ampla oscilação (mínima de

55,4% e máxima de 89,9%), criando um ambiente atmosférico de déficit hídrico leve a moderado. A radiação solar média de 4111 Wh/m² e a evapotranspiração de referência (ET₀) de 3,15 mm reforçam a hipótese de maior demanda evaporativa, contribuindo para o balanço hídrico negativo evidenciado pelo NDWI. Laurenti et al. (2022) demonstraram em sistemas integrados de produção que mesmo em condições de fertilidade adequada, a variabilidade espacial do microclima e da disponibilidade hídrica pode explicar diferenças no desenvolvimento vegetativo, resultado que converge com as observações deste estudo.

Os resultados obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) revelam um relevo caracterizado por forte variabilidade altimétrica e acentuadas diferenças topográficas ao longo da área estudada, como pode ser observado na Figura 5.

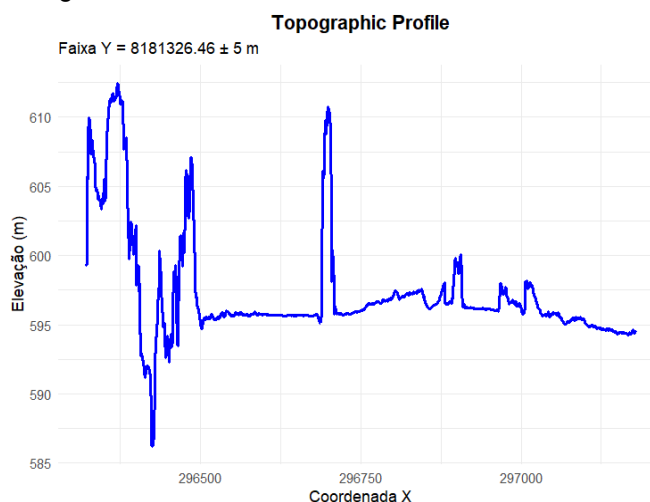


Figura 5 - Perfil Topográfico - Elevação ao longo do eixo X dentro da faixa Y = ± 5,0 m. A linha contínua representa a elevação média agregada ao longo do transecto definido.

A elevação mínima registrada foi de 578,5 m e a máxima de 644,94 m, resultando em amplitude de 66,44 m, com média de 599,34 m e desvio-padrão de 11,08 m, o que indica variação moderada da altitude. O coeficiente de variação de 1,85% sugere relativa homogeneidade altimétrica em termos percentuais, embora o perfil topográfico plotado pelo R evidencie trechos com rupturas abruptas e picos localizados, confirmando a presença de feições de maior irregularidade. A declividade média de 21,76° reforça o caráter ondulado a fortemente inclinado do terreno, sendo que mais da metade da área (51,27%) apresenta inclinações superiores a 15°, configurando condição de alta suscetibilidade à erosão e restrições ao uso agrícola mecanizado. Em contrapartida, apenas 16,78% da área possui declividade inferior a 0,5°, representando

superfícies planas favoráveis à mecanização e implantação de culturas anuais.

A análise de orientação das vertentes mostrou distribuição relativamente equilibrada entre os quadrantes, com predominância sutil para o sul (28,12%), seguido por leste (25,16%), oeste (25,06%) e norte (21,66%). Essa heterogeneidade altimétrica e de exposição solar sugere que o microclima e a disponibilidade hídrica variam ao longo da paisagem, influenciando diretamente a distribuição da vegetação natural e das culturas agrícolas. Segundo Zhao et al. (2021), a caracterização detalhada do relevo é essencial para o planejamento do tráfego de máquinas agrícolas, pois atributos como declividade e orientação do terreno impactam diretamente a compactação do solo, a eficiência do manejo hídrico e a estabilidade operacional dos equipamentos.

CONCLUSÃO

A digitalização da Fazenda Experimental Santa Paula evidenciou que a integração de sensoriamento remoto multiespectral, fotogrametria e dados meteorológicos permite caracterizar com precisão o vigor vegetativo, o estado hídrico e as limitações topográficas da área. Os índices espectrais apontaram vegetação ativa, porém com sinais iniciais de estresse hídrico, enquanto o modelo digital de elevação revelou grande proporção de áreas íngremes, reforçando a necessidade de manejo conservacionista. Esses resultados confirmam o potencial das tecnologias digitais como suporte ao planejamento agrícola sustentável e à consolidação de práticas de agricultura de precisão em ambientes experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo fomento à formação e à pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- Abbasi, Rabiya, et al. "The Digitization of Agricultural Industry – a Systematic Literature Review on Agriculture 4.0". *Smart Agricultural Technology*, vol. 2, dezembro de 2022, p. 100042. (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>.
- Abiri, Rambod, et al. "Application of Digital Technologies for Ensuring Agricultural Productivity". *Heliyon*, vol. 9, no 12, dezembro de 2023, p. e22601. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22601>.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. D. M.; Sparovek, G. Köppen's Climate Classification Map For Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, V. 22, N. 6, P. 711-728, 2013.
- Fanelli, Rosa Maria. "The Spatial and Temporal Variability of the Effects of Agricultural Practices on the Environment". *Environments*, vol. 7, no 4, abril de 2020, p. 33. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/environments7040033>.
- Fusco, Giulio, et al. "The Environmental Impact of Agriculture: An Instrument to Support Public Policy". *Ecological Indicators*, vol. 147, março de 2023, p. 109961. (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109961>.
- Laurenti, Nicolle, et al. "Spatial variability of soil and vegetation properties in integrated production systems". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 28, no 10, outubro de 2024, p. e280481. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n10e280481>.
- Laurett, Rozélia, et al. "Antecedents and Consequences of Sustainable Development in Agriculture and the Moderator Role of the Barriers: Proposal and Test of a Structural Model". *Journal of Rural Studies*, vol. 86, agosto de 2021, p. 270–81. (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.06.014>.
- Liang, Xiongwei, et al. "Multi-Scale Remote-Sensing Phenomics Integrated with Multi-Omics: Advances in Crop Drought–Heat Stress Tolerance Mechanisms and Perspectives for Climate-Smart Agriculture". *Plants*, vol. 14, no 18, setembro de 2025, p. 2829. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/plants14182829>.
- Mamabolo, Emogine, et al. "Application of Precision Agriculture Technologies for Crop Protection and Soil Health". *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, dezembro de 2025, p. 101270. (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101270>.
- Melnyk, Oleksandr, e Ansgar Brunn. "Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine". *Earth*, vol. 6, no 2, abril de 2025, p. 28. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/earth6020028>.
- Naime, U. J., et al. Solos e avaliação do potencial agrossilvipastoril das microrregiões Paracatu e Unai - Minas Gerais. Belo Horizonte: Epamig, 2014., 2014. www.alice.cnptia.embrapa.br/http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1036511.
- Santana, Lucas Santos, et al. "Residual Ash Mapping and Coffee Plant Development Based on Multispectral RPA Images". *Remote Sensing*, vol. 16, no 11, janeiro de 2024, p. 1917. www.mdpi.com, <https://doi.org/10.3390/rs16111917>.
- Taipalus, Toni. "Vector Database Management Systems: Fundamental Concepts, Use-Cases, and Current Challenges". *Cognitive Systems Research*, vol. 85, junho de 2024, p. 101216. (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2024.101216>.
- Vărzaru, Anca Antoaneta. "Digital Revolution in Agriculture: Using Predictive Models to Enhance Agricultural Performance Through Digital Technology". *Agriculture*, vol. 15, no 3, janeiro de 2025, p. 258. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/agriculture15030258>.
- Zhang, Shuang, et al. "A Review of the Application of UAV Multispectral Remote Sensing Technology in Precision Agriculture". *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, dezembro de 2025, p. 101406. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101406>.
- Zhao, Wei, et al. "Terrain Analytics for Precision Agriculture with Automated Vehicle Sensors and Data Fusion". *Sustainability*, vol. 13, no 5, março de 2021, p. 2905. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/su13052905>.