

Dense cloud é necessária? Impacto na fenotipagem de alto rendimento em milho via drone

Gabriel A. J. FERRAZ¹; José L. de A. R. PEREIRA²; Marcelo A. J. Ferraz³; Evandro R. SANTOS⁴; Lais de S. Parra⁵.

RESUMO

A escolha do fluxo de reconstrução fotogramétrica impacta diretamente a acurácia e o tempo de processamento em estudos de fenotipagem com UAV. Este trabalho comparou dois métodos, Tie Point e Dense Cloud, quanto à extração de altura e índices espectrais em quatro híbridos de milho. Os ortomosaicos gerados por ambos os métodos apresentaram respostas espectrais estatisticamente equivalentes, indicando que o Tie Point, mais rápido e menos custoso, é suficiente para esse fim. Entretanto, os modelos digitais de elevação oriundos do Dense Cloud produziram estimativas de altura significativamente mais próximas das medições de campo (maior R^2 , menor RMSE), comprovando sua superioridade na extração morfológica. Os resultados reforçam a adoção de fluxos híbridos, combinando eficiência computacional e acurácia fenotípica conforme o objetivo da análise.

Palavras-chave: selecao assistida; fotogrametria; fenotipagem digital; zea mays.

1. INTRODUÇÃO

A fenotipagem digital tem ganhado destaque na agricultura moderna, especialmente com o uso de veículos aéreos não tripulados (UAVs), que permitem a coleta rápida e precisa de dados morfológicos e espectrais em campo. Entre os principais produtos gerados via fotogrametria estão os ortomosaicos e modelos digitais de elevação (DEMs), utilizados na quantificação de características como altura de planta, vigor e estresse (Ferraz et al., 2024).

A geração desses produtos pode seguir diferentes fluxos de reconstrução tridimensional. O método baseado em Tie Points utiliza apenas pontos de amarração entre imagens para gerar uma nuvem de pontos esparsa, enquanto o método com Dense Cloud inclui uma densificação posterior que resulta em maior detalhamento espacial (Harwin; Lucieer, 2012). Essa diferença pode impactar a acurácia dos dados extraídos, o tempo de processamento e o consumo computacional.

Estudos anteriores sugerem que a reconstrução densa tende a produzir DEMs mais precisos para variáveis morfológicas, como altura (Madec et al., 2017), enquanto os ortomosaicos gerados por ambos os métodos podem apresentar qualidade espectral semelhante (Zarco-Tejada et al., 2014). Contudo, ainda são escassas as comparações diretas entre esses fluxos sob condições experimentais controladas, especialmente considerando a validação com dados reais de campo.

¹Bolsista PIBIC/CNPq, IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes. E-mail: ferrazgf18@gmail.com.

²Orientador, IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes. E-mail: joseluiz.pereira@ifsuldeminas.edu.br.

³Discente do Doutorado, UFLA – Campus Lavras. E-mail: harasmjf@gmail.com.

⁴Discente da Agronomia, IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes. E-mail: evandro.renanroge04@gmail.com.

⁵Discente da Agronomia, IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes. E-mail: Laisparra321123@gmail.com.

Neste contexto, o presente estudo comparou os métodos Tie Point e Dense Cloud aplicados à fenotipagem aérea de híbridos de milho, avaliando sua acurácia na extração de altura de planta e índices espectrais, além do tempo computacional envolvido. Os resultados visam oferecer subsídios técnicos para a escolha de fluxos otimizados conforme o objetivo da análise fenotípica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está localizada em Inconfidentes-MG, na Fazenda-Escola do IFSULDEMINAS Campus Inconfidentes, situada a 914 m de altitude (22°18'37" S, 46°19'55" W). A área foi dividida em 20 parcelas, sob sistema de plantio convencional, espaçamento de 0,8 m entre linhas, população final de 75.000 plantas ha⁻¹, semeadura realizada no dia 01 de novembro de 2024 e utilizados quatro híbridos de milho.

A altura das plantas foi medida manualmente com trena topográfica, do solo até a folha bandeira, em dez plantas aleatórias por parcela. No mesmo dia, no estágio fenológico VT, foi realizado o levantamento aéreo por VANT DJI Phantom 4 Pro V2, a 40 m de altura. A média aritmética das alturas foi calculada por parcela. Cinco pontos de controle no solo (GCP) foram distribuídos uniformemente para garantir referências geográficas precisas (Borges et al., 2022).

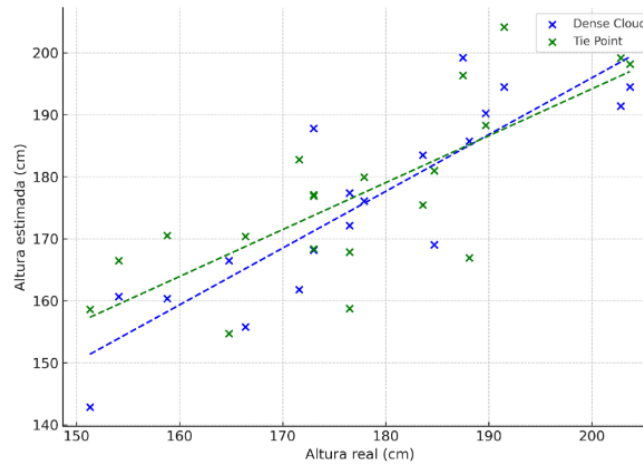
Para o processamento das imagens e criação do DEM, foram definidos dois fluxos de trabalho. Fluxo de trabalho 1 (FT1): inicia-se com o alinhamento das imagens e nuvem de pontos esparsos (Tie points), marcação e otimização dos pontos de controle, realinhamento, construção do modelo 3D e DEM; Fluxo de trabalho 2 (FT2): alinhamento das imagens (Tie points), marcação e otimização dos pontos de controle, realinhamento, geração da nuvem densificada de pontos (Dense cloud), construção do modelo 3D e DEM.

O conjunto de dados foi inicialmente avaliado quanto à normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk (1965). Os índices de vegetação foram analisados utilizando a correlação de Pearson, enquanto os dados referentes à altura das plantas foram submetidos à análise de regressão linear. A precisão das equações ajustadas foi verificada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Todas as análises estatísticas foram conduzidas com o uso do ambiente computacional R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de regressão mostrou que ambas as fontes de extração de altura (Tie Point e Dense Cloud) apresentaram correlação significativa com os dados reais obtidos em campo ($p < 0.01$). O método Dense Cloud exibiu maior R^2 (0.88) e RMSE (13.71 cm), indicando maior acurácia e fidelidade na modelagem da altura. Enquanto Tie Point apresentou maior impacto quanto à resolução espacial e menor ajuste do modelo de regressão ($R^2 = 0.75$ e RMSE = 20.97 cm) (Figura 1). Portanto, a regressão mostra que o DEM gerado por Dense Cloud é significativamente mais fiel às medições reais de campo em comparação ao Tie Point.

Figura 1. Valores de altura de plantas real e estimadas por meio de imagens aéreas.



A reconstrução densa da nuvem de pontos (Dense Cloud) melhora a interpolação da superfície do dossel, principalmente em culturas com arquitetura mais complexa, como o milho. Apesar de demandar mais tempo computacional, o método mostrou superioridade técnica em relação à extração baseada apenas nos Tie Points. Esse ganho de precisão é relevante em aplicações onde diferenças pequenas de altura entre genótipos devem ser detectadas (Wang et al., 2022; Ferraz et al., 2024).

A extração dos índices espectrais não apresentou diferença estatística significativa entre os métodos avaliados, já que todos os índices de vegetação exibiram correlações muito altas ($r > 0,997$) (Tabela 1), confirmando que os ortomosaicos gerados via Tie Point são equivalentes aos obtidos pelo Dense Cloud. Assim é válido a hipótese de que o Tie Point pode ser empregado como alternativa eficiente e mais econômica para análises espectrais, o Dense Cloud mantém sua importância em análises morfológicas, por fornecer maior detalhamento espacial (Fuentes-Peailillo et al., 2018).

Tabela 1. Correlação entre índices de vegetação extraídos via Tie Point e Dense Cloud.

Índice de vegetação	Correlação de Pearson
VARI	0.997
NGRDI	0.998
GLI	0.998
VDVI	0.997

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a escolha do fluxo de reconstrução fotogramétrica deve ser orientada pelo objetivo da análise fenotípica. O método Dense Cloud apresentou maior acurácia na estimativa da altura de plantas de milho, evidenciando-se como a alternativa mais adequada para estudos morfológicos. Por outro lado, os ortomosaicos gerados via **Tie Point** mostraram-se equivalentes em termos espectrais, possibilitando a extração confiável de índices de vegetação com menor custo computacional e maior rapidez de processamento.

Dessa forma, confirma-se a hipótese de que ambos os métodos são válidos, desde que aplicados de acordo com a finalidade da pesquisa, sendo recomendada a adoção de fluxos híbridos que conciliem eficiência operacional e qualidade dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Ao IFSULDEMINAS Campus Inconfidentes, aos professores, ao grupo GEAGRO e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

AASEN, Helge; BURKART, Andreas; BOLTEN, Andreas; BARETH, Georg. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. **Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 108, p. 245-259, out. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002>. Acesso em: 22 jun. 2025.

BORGES, L. C.; NASCIMENTO, A. dos R.; MORGADO, C. M. A. Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos. *Scientific Electronic Archives*, v. 15, n. 3, 28 fev. 2022. *Scientific Electronic Archives*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36560/15320221520>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FERRAZ, Marcelo Araújo Junqueira; BARBOZA, Thiago Orlando Costa; ARANTES, Pablo de Sousa; VON PINHO, Renzo Garcia; SANTOS, Adão Felipe dos. Integrating Satellite and UAV Technologies for Maize Plant Height Estimation Using Advanced Machine Learning. **Agriengineering**, v. 6, n. 1, p. 20-33, jan. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/agriengineering6010002>. Acesso em: 17 jul. 2025.

FUENTES-PEAILILLO, F.; ORTEGA-FARIAS, S.; RIVERA, M.; BARDEEN, M.; MORENO, M.. Comparison of vegetation indices acquired from RGB and Multispectral sensors placed on UAV. **2018 Ieee International Conference On Automation/Xxiii Congress Of The Chilean Association Of Automatic Control (Ica-Acca)**, p. 1-6, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ica-acca.2018.8609861>. Acesso em: 14 jul. 2025.

HARWIN, Steve; LUCIEER, Arko. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1573-1599, mai. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs4061573>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MADEC, Simon; BARET, Fred; SOLAN, Benoît de; THOMAS, Samuel; DUTARTRE, Dan; JEZEQUEL, Stéphane; HEMMERLÉ, Matthieu; COLOMBEAU, Gallian; COMAR, Alexis. High-Throughput Phenotyping of Plant Height: comparing unmanned aerial vehicles and ground lidar estimates. **Frontiers In Plant Science**, v. 8, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.02002>. Acesso em: 05 jul. 2025.

R CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing (4.3.3)[software]**. 2024.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality(complete sample). **Biometrika**, GreatBritain, v.52, n.3, p.591-611, 1965.

WANG, Dunliang; LI, Rui; ZHU, Bo; LIU, Tao; SUN, Chengming; GUO, Wenshan. Estimation of Wheat Plant Height and Biomass by Combining UAV Imagery and Elevation Data. **Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 9, dez. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13010009>. Acesso em: 08 jul. 2025.

ZARCO-TEJADA, P.J.; DIAZ-VARELA, R.; ANGILERI, V.; LOUDJANI, P.. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European Journal Of Agronomy**, v. 55, p. 89-99, abr. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>. Acesso em: 19 jun. 2025.