



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

FENOTIPADO DE ALTO CAUDAL PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURA DE PLANTA EN MAÍZ MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Menes, J. F.^{*1}; Galizia, L.A.¹; Presello, D. A.¹; Schrauf, G. E.³; Portillo, J.E.^{1,2}

¹ INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Av. Frondizi (Ruta 32) km 4,5, B2700, Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

² Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires. Av. Libertad 555, B6000 Junín, Buenos Aires, Argentina.

³ Universidad de Buenos Aires. Facultad de agronomía. Cátedra de genética. Av. San Martín 4453, C1417DSE, Buenos Aires, Argentina.

[*menes.josefernando@inta.com.ar](mailto:menes.josefernando@inta.com.ar)

HIGH-THROUGHPUT PHENOTYPING FOR PLANT HEIGHT ESTIMATION IN MAIZE USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Plant height in maize is related to lodging resistance and is a useful covariate for estimating biomass from remote sensing data. Because manual measurement is labor-intensive, this study aimed to develop an unmanned aerial vehicle (UAV)-based protocol to estimate this trait. Seventy-two genotypes, comprising hybrids and inbred lines, were evaluated. The protocol involved generating a digital surface model from a post-flowering (R5) flight and a digital terrain model through interpolation of bare soil points; the difference between both yielded the canopy height model. Then, the 100th, 99th, 95th, and 90th percentiles were extracted for each plot, and evaluated against field measurements. Although P100 and P99 achieved the best predictive fit ($R^2=0.86$; RMSE=8 cm; NRMSE=5.05%), P95 ($R^2=0.84$; RMSE=9 cm; NRMSE=5.47%) was selected because it showed higher heritability than both the manual measurements and the other percentiles, indicating a greater capacity to discriminate genetic differences. In conclusion, P95 is the optimal statistic for this protocol, demonstrating that photogrammetry outperforms the traditional measurements by reducing operator-associated variability while capturing the full structure of the plot with high precision.

Palabras clave: dron, *Zea mays*, mejoramiento genético, sensores remotos.

Keywords: drone, *Zea mays*, plant breeding, remote sensing.

Introducción

La altura de planta en maíz es un rasgo que está asociado con la susceptibilidad al vuelco y al quebrado de tallo, dos factores que pueden ocasionar importantes dificultades en la cosecha y pérdidas de rendimiento. Recientemente, el desarrollo de híbridos de maíz de baja estatura (*short-stature corn*) ha revalorizado este rasgo dentro de los programas de mejoramiento genético, debido a que estos materiales buscan incrementar la resistencia al vuelco, favorecer mayores densidades de siembra y mantener el potencial de rendimiento (Stubbs et al., 2023). Adicionalmente, la altura constituye una covariable estructural clave para el fenotipado dado que los índices espectrales tienden a saturarse rápidamente; la integración de ambas variables permite mejorar la predicción de otras más complejas, como la biomasa (Smith et al., 2024). Sin embargo, la recolección manual de estos datos en campo requiere una inversión



considerable de tiempo y recursos humanos, lo cual representa una severa limitante al evaluar cientos de materiales (Araus y Cairns, 2014).

Frente a este cuello de botella, las plataformas de fenotipado de alto caudal, en particular los vehículos aéreos no tripulados (VANT), permiten superar estas limitaciones. A través de la fotogrametría con VANTs, es posible generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) para estimar variables estructurales del dosel, como la altura o el volumen a nivel de parcela (Yang et al., 2017). La adopción de estas tecnologías encuentra su mayor obstáculo en la complejidad de procesar datos masivos, lo cual exige el desarrollo de flujos de trabajo prácticos y protocolos estandarizados que no dependan de conocimientos en programación avanzados (Reynolds et al., 2020).

En este sentido, QGIS (QGIS Development Team, 2023) destaca por ser un software libre con una interfaz amigable, que permite implementar protocolos estandarizados y reproducibles sin requerir conocimientos de programación, facilitando su adopción en contextos con recursos o personal especializado limitados (Killian et al., 2025). Asimismo, para que estos protocolos sean adoptados de forma definitiva, resulta indispensable comprobar que la estimación remota a nivel de parcela mantenga una alta precisión y capture las diferencias genéticas con igual o mayor eficacia que la medición manual.

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar y validar un protocolo para estimar la altura de híbridos y líneas endocriadas mediante MDE obtenidos a partir de VANT y evaluar su precisión frente a las mediciones tradicionales en terreno.

Materiales y Métodos

El ensayo se realizó en la EEA Pergamino del INTA durante la campaña 2023-24 (Coordenadas: 33°57'31.5"S 60°33'58.0"W), bajo condiciones de secano. La fecha de siembra fue el 9 de noviembre de 2023. Se evaluaron 72 materiales genéticos, 16 líneas endocriadas y 56 híbridos. Los materiales genéticos estuvieron conformados por 12 líneas endocriadas del programa de maíz de FAUBA utilizadas como hembras y 4 líneas del programa de maíz templado de INTA empleadas como machos, a partir de las cuales se obtuvieron 48 híbridos (entre ellos un híbrido triple) y 8 híbridos como testigos, de los cuales uno corresponde al híbrido comercial ACA 514 y los otros 7 fueron híbridos experimentales generados a partir de líneas endocriadas del INTA. Por problemas de implantación no se incluyeron en el análisis 2 líneas endocriadas, pero sí sus híbridos derivados. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada unidad experimental consistió en una parcela de cuatro surcos, con 5 metros de longitud, separación entre hileras de 0,70 m y una densidad de siembra de 8 plantas/m².

Para la obtención de las imágenes se utilizó un dron DJI Matrice 300 equipado con un sensor multispectral MicaSense Altum. El vuelo se realizó en postfloración (116 días después de la siembra) a 40 metros de altura y con un 75 % de superposición entre imágenes. El procesamiento fotogramétrico se ejecutó en Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2022) y se generó un Modelo Digital de Superficie (MDS) con una resolución espacial de 3,48 cm/píxel. El MDS representa la elevación de todos los elementos presentes en la escena, incluyendo el suelo y la vegetación, por lo que no permite estimar

directamente la altura de las plantas. Para ello, es necesario disponer de la elevación del terreno como superficie de referencia. Con este fin, se utilizó QGIS (QGIS Development Team, 2023) y el complemento fieldimageR (Matias et al., 2020), mediante el cual se interpolaron puntos marcados sobre suelo desnudo (camino entre las parcelas) para generar un Modelo Digital de Terreno (MDT). Finalmente, la altura de las plantas se estimó mediante el Modelo de Altura de Canopeo (MAC), calculado como la diferencia entre el MDS y el MDT ($MAC = MDS - MDT$) (Figura 1).

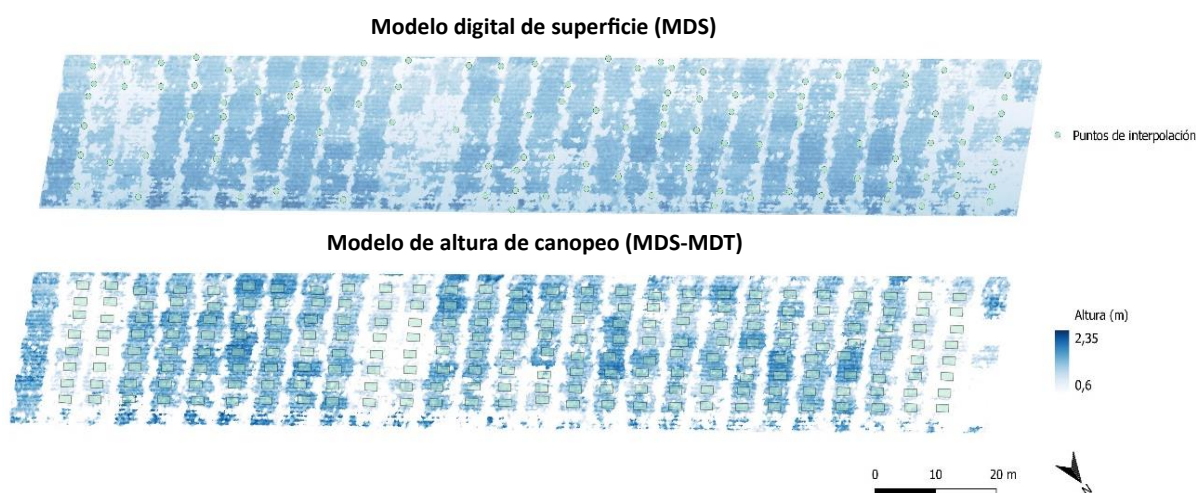


Figura 1 Modelos de elevación. Arriba: Modelo Digital de Superficie (MDS). Abajo: Modelo de Altura de Canopeo ($MAC = MDS - MDT$). El MDT se interpoló utilizando puntos de suelo desnudo (verde). Rectángulos: regiones de interés de cada parcela.

Con el fin de evitar el efecto borde durante la extracción de datos del MAC, se delimitaron automáticamente regiones de interés (ROI) de 1,40 m de ancho por 2 m de largo en cada parcela utilizando el complemento *Magic Microplots Shape Generator* (Figura 2) (Menes, 2026).

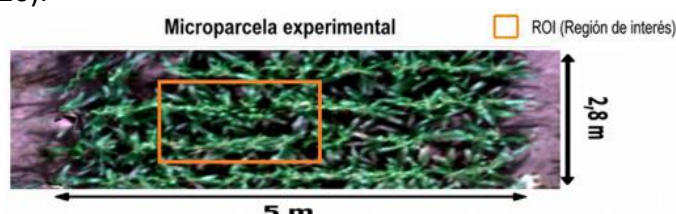


Figura 2 Parcela experimental de 4 surcos ($5 \times 2,8$ m). Región de interés (ROI) delimitada en naranja.

A partir de estas ROI, se extrajeron los percentiles 100 (altura máxima), 99, 95 y 90 (P100, P99, P95 y P90, respectivamente) con el propósito de comparar cuál de estos tiene mayor precisión para estimar la altura de las plantas (Fig. 3). Estos percentiles fueron seleccionados por representar la cola superior de la distribución de alturas dentro de cada parcela, asociada a la parte superior del dosel, mientras que medidas de tendencia central, como la media o la mediana, reflejan la altura promedio del dosel y tienden a subestimar la altura real de las plantas.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

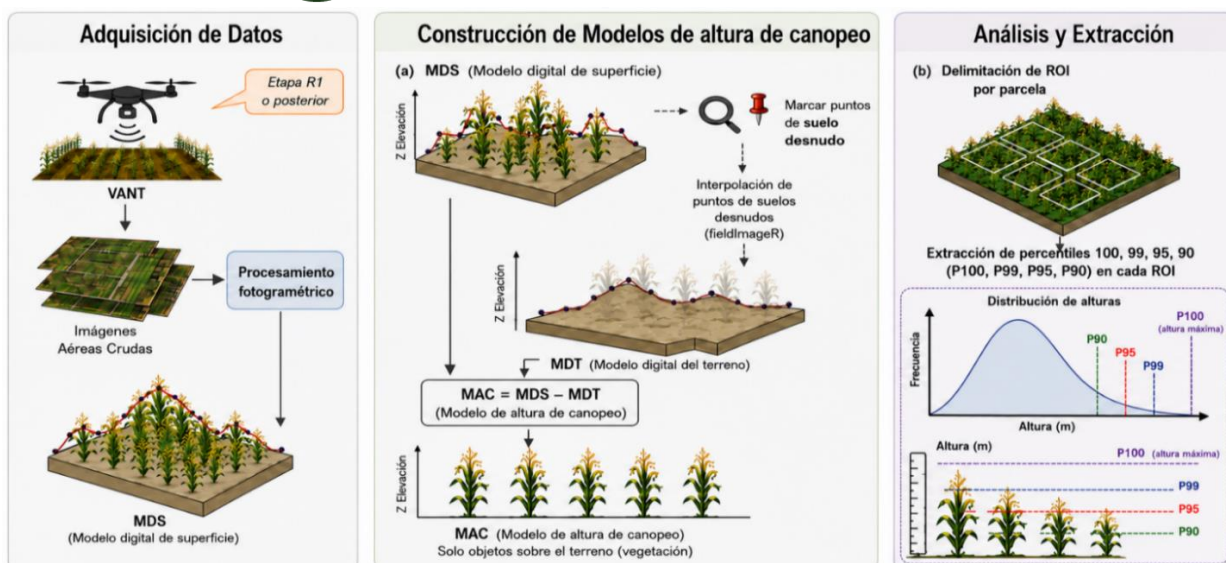


Figura 3 Flujo de trabajo para la estimación de la altura de planta a partir de imágenes adquiridas con VANT. (a) Generación del modelo de canopeo a partir del MDS y el MDT. (b) Extracción de percentiles de altura en cada ROI.

Como verdad de terreno, se midió la altura hasta la última hoja en cinco plantas por parcela. La relación entre los percentiles y las mediciones de campo se evaluó mediante regresiones lineales utilizando los parámetros R^2 , RMSE y NRMSE. Adicionalmente, Se estimó la heredabilidad como el cociente entre la varianza genética y la varianza total. Los componentes de varianza se estimaron mediante un modelo lineal mixto, considerando genotipos y bloques como efectos aleatorios. El modelo se ajustó con lme4 (Bates et al., 2015) en RStudio (R Core Team, 2023).

Resultados y discusión

La relación entre la altura estimada por el VANT y la medida en campo mostró una fuerte correlación, con valores de R^2 entre 0,81 y 0,86 y un RMSE de entre 8 y 9 cm mientras los errores normalizados estuvieron entre 5,05 % y 5,88 % (Figura 4). Los mejores ajustes correspondieron a la altura máxima o P100 y al P99 con un $R^2=0,86$; RMSE=8 cm; NRMSE=5,05 %; seguido del P95 con $R^2=0,84$; RMSE=9 cm; NRMSE=5,47 % y por último el P90 con $R^2 = 0,81$; RMSE=9 cm; NRMSE=5,88%. En cuanto a los P100 y P99 tendieron a sobreestimar la altura real, el P90 subestimo la altura real y el P95 mostró la distribución más equilibrada frente a la relación 1:1 (Figura 4).



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

(A) Altura Máxima, (B) Percentil 99 (P99), (C) Percentil 95 (P95), (D) Percentil 90 (P90)

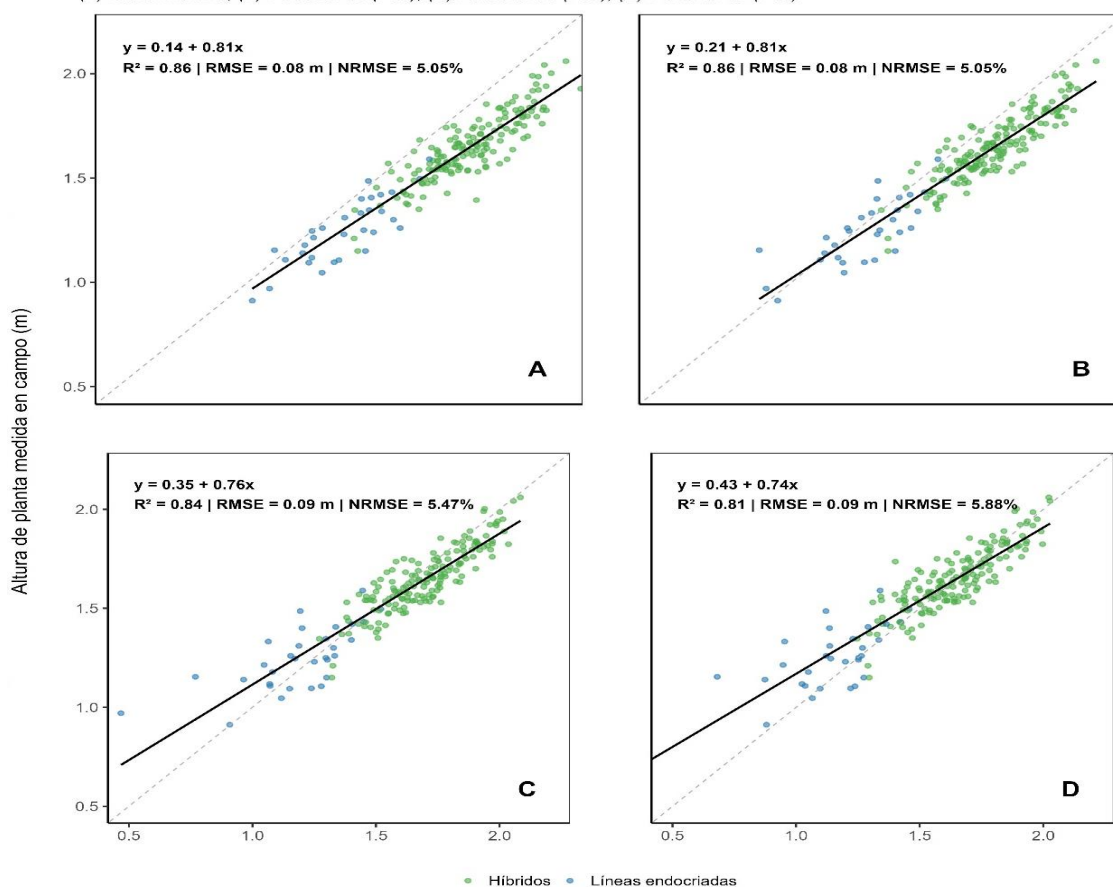


Figura 4 Altura estimada mediante MDE vs. manual extraída como: (A) P100, (B) P99, (C) P95 y (D) P90. Azul: líneas endocriadas; verde: híbridos. Línea continua: regresión; punteada: 1:1.

Al evaluar la heredabilidad en sentido amplio (H^2), algunos percentiles del VANT mostraron una clara superioridad (Tabla 1). En líneas endocriadas, la medición manual presentó una H^2 de 0,72, mientras que el P95 alcanzó un valor de 0,85. En híbridos, los P90 y P95 registraron 0,82, superando levemente a la medición manual (0,81). Estos resultados indican una mayor capacidad del MAC para discriminar diferencias genéticas. La menor heredabilidad de las mediciones manuales se atribuye a la subjetividad al seleccionar las plantas evaluadas, al error inducido por la fatiga del operario y a las irregularidades del microrrelieve. Por otro lado, el P95 integra toda la parcela, reduciendo el efecto de plantas dominantes y logrando una representación más estable. Estos hallazgos son consistentes con otros estudios donde mediante fotogrametría se obtuvieron $R^2=0,63$, un $RMSE=7$ cm y una H^2 de 0,74, con un valor comparable a la H^2 en la medición manual (0,78) en el cultivo de sorgo (Hu et al., 2018).

Tabla 1 Heredabilidad (H^2) para altura de planta (verdad de terreno, P100, P99, P95 y P90), diferenciada por híbridos y líneas.

Tipo de material	Verdad de terreno	Valor máximo	P100	P99	P95	P90
Híbridos	0,81	0,72	0,79	0,82	0,82	
Líneas	0,72	0,72	0,75	0,85	0,82	



Conclusiones

Se desarrolló y validó un protocolo de fenotipado basado en VANT para estimar la altura de planta en híbridos y líneas de maíz. El procedimiento integra la obtención de MDS, la generación de MDT por interpolación de suelo desnudo y el cálculo del MAC mediante software libre para extraer el percentil 95. El método logró alta precisión ($R^2=0,84$; RMSE = 9 cm; NRMSE = 5,47%) y una heredabilidad superior a la medición manual demostrando mayor capacidad para discriminar diferencias genéticas. Si bien la altura total cobra su verdadero valor en conjunto con la de la espiga, cuya estimación de mayor complejidad se abordará en otros trabajos, este protocolo reduce el error experimental, optimiza el tiempo y sienta bases firmes para utilizarla como covariable en la estimación de biomasa y otras variables ecofisiológicas.

Bibliografía

- Agisoft LLC. (2022). *Agisoft Metashape* (1.8.5). <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Hu, P., Chapman, S. C., Wang, X., Potgieter, A., Duan, T., Jordan, D., Guo, Y., Zheng, B., & Corresponding, C. (2018). *Estimation of plant height using a high throughput phenotyping platform based on unmanned aerial vehicle and self-calibration: example for sorghum breeding*.
- Killian, E. Z., Eberly, J. O., & Lachowiec, J. (2025). Utilizing QGIS for open-source UAV imagery plant classification and plot segmentation. *Plant Phenome Journal*, 8(1). <https://doi.org/10.1002/ppj2.70030>
- Matias, F. I., Caraza-Harter, M. V., & Endelman, J. B. (2020). FIELDImageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. *Plant Phenome Journal*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/ppj2.20005>
- Menes, J. F. (2026). *Magic Microplots Shape Generator – UAV* (0.01). Zenodo. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.18231789>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System* (3.34.0.). <http://qgis.org>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (4.3.1). <https://www.R-project.org>
- Reynolds, M., Chapman, S., Crespo-Herrera, L., Molero, G., Mondal, S., Pequeno, D. N. L., Pinto, F., Pinera-Chavez, F. J., Poland, J., Rivera-Amado, C., Saint Pierre, C., & Sukumaran, S. (2020). Breeder friendly phenotyping. In *Plant Science* (Vol. 295). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110396>
- Smith, D. T. L., Chen, Q., Massey-Reed, S. R., Potgieter, A. B., & Chapman, S. C. (2024). Prediction accuracy and repeatability of UAV based biomass estimation in wheat variety trials as affected by variable type, modelling strategy and sampling location. *Plant Methods*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01236-w>
- Stubbs, C. J., Kunduru, B., Bokros, N., Verges, V., Porter, J., Cook, D. D., DeBolt, S., McMahan, C., Sekhon, R. S., & Robertson, D. J. (2023). Moving toward short stature maize: The effect of plant height on maize stalk lodging resistance. *Field Crops Research*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109008>
- Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., Xu, B., Yang, X., Zhu, D., Zhang, X., Zhang, R., Feng, H., Zhao, X., Li, Z., Li, H., & Yang, H. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: Current status and perspectives. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII CONGRESO NACIONAL DE MAÍZ

