

Comparación de métodos de relevamiento topográfico para el diseño de trabajo de campo con RPA/drone

Comparison of Topographic Survey Methods for Fieldwork Design Using Drones

Sonia Laura Lanzelotti^{1,2,3*}, Federico Nicolás Chait^{1,2}, Eloy José Montes Galbán³, Noelia Cecilia Principi³ y Marcelo Alejandro Lamamí¹

¹ Instituto de las Culturas, Universidad de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Bartolomé Mitre 1970 5to A, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, C.P. 1039. sonia.lanzelotti@conicet.gov.ar, marcelo5144@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3617-9466>, <https://orcid.org/0009-0008-8570-7350>

² Departamento de Ciencias Antropológicas, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Puan 480, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, C.P. 1406. federico.chait@uba.ar, <https://orcid.org/0009-0001-1563-9929>

³ Instituto de Investigaciones Geográficas, Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján, Ruta Nacional 5 y Av. Constitución, Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina, C.P. 6700. emontesgalban@conicet.gov.ar, nprincipi@unlu.edu.ar, <https://orcid.org/0000-0002-4075-4873>, <https://orcid.org/0000-0002-8819-6743>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 24/09/2025. Aceptado: 20/12/2025. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Lanzaletti, S. L., Chait, F. N., Montes Galbán, E., Principi, N. C. y Lamamí, M. A. (2026). Comparación de métodos de relevamiento topográfico para el diseño de trabajo de campo con RPA/drone. *Geografía Aplicada*, 2(1), 50-74.

Resumen

En este artículo se compara la exactitud y la precisión que se obtiene en productos topográficos elaborados a partir de imágenes capturadas mediante RPA/drone, utilizando distintas metodologías de relevamiento. Estas son: colocación de puntos de apoyo fotogramétricos (PAF) en distinta cantidad y forma de distribución, diferente instrumental utilizado para la medición (GPS navegador, nivel óptico, estación total), y registro de imágenes a diferentes alturas de vuelo. Se elaboraron Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortofoto para cada una de las estrategias de relevamiento y se calcularon cuatro parámetros estadísticos de error. Se observa que la incorporación de 5 a 7 PAF es suficiente para las aplicaciones a escalas 1:500. A partir de 8 PAF se obtienen productos útiles para todas las escalas de representación cartográfica; la altura de vuelo impacta poco sobre la precisión del MDE, pero afecta la identificación de formas en la ortofoto; la exactitud geodésica medida con estación total o con nivel óptico escalado con medidas de distancia arroja resultados disímiles, aunque la precisión en ambos casos muestra una fuerte coherencia al interior de los modelados. Los resultados son de utilidad en el diseño de relevamientos para aplicaciones en producción agropecuaria, arqueología, biología, geografía y ordenamiento territorial.

Palabras clave: Relevamiento topográfico, RPA/drone, Exactitud y precisión, Fotogrametría, Modelos de Elevación Digital, Planificación de trabajo de campo.

Abstract

This article aims to compare the accuracy and precision of topographic products generated from drone/RPA imagery, using different survey methodologies: varying the number and

distribution of photogrammetric control points (PAF), the measurement instruments used (handheld GPS, optical level, total station), and image capture at different flight altitudes. Digital Elevation Models (DEM) and orthophotos were produced for each survey strategy, and four statistical error parameters were calculated. Results show that using 5 to 7 PAFs is sufficient for applications at scales of 1:500 and larger, while 8 or more PAFs yield products suitable for all cartographic representation scales. Flight altitude has little impact on DEM precision but does affect the identification of features in orthophotos. Geodetic accuracy measured with total stations or with optical levels scaled using distance measurements shows variability, although the internal precision of the models remains consistent in both cases. These results are useful in designing survey strategies for applications in agriculture, archaeology, biology, geography, and land-use planning.

Keywords: Topographic Survey, UAV, Accuracy and Precision, Photogrammetry, Digital Elevation Models (DEMs), Fieldwork Planning.

1. Introducción

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) ofrecen formas de acceder y conceptualizar la realidad geográfica mediatizada por la informática, sustentadas por un Paradigma Geotecnológico que ha generado un gran impacto en la Geografía y también en otras ciencias que toman como hilo conductor el enfoque espacial (Buzai, 1999). Las Geotecnologías refieren a un conjunto de conocimientos técnicos, con sustento científico, para manejar información geográfica, asociada a coordenadas, y que pueden ser aplicables a diferentes campos disciplinarios, a partir de hardware, software y técnicas que soportan funciones de obtención, procesamiento, visualización y difusión de dicha información (Moreno, 2013). En los últimos años, el desarrollo y popularización de las geotecnologías a partir del uso de los drones o RPAs (Aeronaves Pilotadas Remotamente, del inglés, *Remotely Piloted Aircraft*), ha expuesto la posibilidad de tomar y poner a disposición fotografías aéreas a baja altura y de gran calidad desde el punto visual y métrico, con las cuales se

pueden generar, a partir de técnicas de restitución fotogramétrica, diversos productos digitales que son la base para la elaboración de planos, mapas y otras imágenes de interés para una gran diversidad de aplicaciones en diferentes campos de conocimiento y gestión de recursos naturales y culturales.

Entre las grandes ventajas de la utilización de RPA para el relevamiento planialtimétrico se pueden mencionar: la reducción de costos en términos de tiempo, trabajo y cantidad de operadores, la posibilidad de explorar áreas peligrosas o inaccesibles, y que permite el registro sin invadir ni destruir los recursos naturales/culturales ni su entorno (Domínguez y Martínez, 2019). Sin embargo, es importante notar que la información capturada mediante RPAs requiere validaciones y calibración local bajo condiciones de campo para ser consideradas de alta precisión (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) elaborados por fotogrametría a partir de imágenes tomadas con drones pueden variar notablemente en su precisión y exactitud, y contener errores, ya sea sistemáticos o accidentales, que ocurren desde la planificación del vuelo hasta el procesamiento de las imágenes. De acuerdo con Jiménez-Jiménez et al. (2017), entre los errores sistemáticos se encuentran: la precisión que brinda el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con el que se obtienen las coordenadas, a la sensibilidad del RPA al viento, a la capacidad de pilotaje autónomo del RPA y/o la calidad baja de sus sensores (que afectan aleatoriamente la altitud y ubicación en el vuelo), al tipo de RPA seleccionado (los multirrotores son más estables que los de ala fija) y a la precisión geométrica de la cámara provocada por la distorsión del objetivo. Por otro lado, y de acuerdo a los mismos autores, los errores accidentales pueden deberse a la falta de calibración de los parámetros internos de la cámara, al porcentaje bajo de traslape entre imágenes (< 70 %), al enfoque de la cámara en el vuelo (ya que puede que no se mantenga fijo, lo que hace que la distancia focal varíe), al número de puntos de control seleccionados y a su distribución en el terreno, y a la deficiente identificación de los puntos de control en las imágenes dentro del programa de restitución fotogramétrica.

Por otro lado, Novara y Jacamo (2020) realizaron un estudio para determinar altura de vuelo óptima para elaboración de MDE de entornos naturales (geoformas) y construidos (infraestructura), sin la utilización de PAF. Así, advirtieron que a partir de una altura de vuelo de 60 m AGL, se va degradando paulatinamente la delimitación de los bordes de las estructuras edilicias haciendo difícil su identificación y aumentando impresión de las mediciones que resultan cada vez mayores no solo frente a la verdad del terreno (precisión absoluta), sino también respecto a los demás elementos mensurados al interior de los modelados (precisión relativa). Por otro lado, Santecchia et al. (2023) propusieron que para mejorar la exactitud en el valor de la altura de los MDE generados a partir de imágenes tomadas con RPA se deben colocar PAF en terreno, pero también sobre las edificaciones, en vista de lograr un catastro 3D confiable.

Recientemente, Lanzelotti et al. (2025) puntualizaron que las imágenes de sitios arqueológicos relevados con RPA suelen mostrar con gran detalle las características del sustrato, la vegetación, los muros y hasta los mampuestos que componen los distintos tipos de estructuras arqueológicas, sin embargo, la calidad visual de los productos no guarda relación directa con su precisión fotogramétrica. A partir de una investigación experimental sobre un sitio arqueológico de 58 hectáreas, los autores cuantificaron los umbrales de exactitud de los productos cartográficos según la cantidad y distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétricos (PAF) para lograr la utilidad tanto de la ortofoto como del MDE y sus productos derivados (curvas de nivel, pendiente, sombreado, orientación, curvatura, etc.).

Por otro lado, Reche (2024) ha señalado que la definición de precisión y exactitud de un MDE dependerá de los propósitos de su utilización. Por ejemplo, las escalas cartográficas comúnmente empleadas en el diseño de sistemas de terrazas agrícolas, van desde 1:2000 a 1:5000, pudiendo ser, ocasionalmente, mayores (1:500 o 1:1000) por lo que el autor propone la utilización de nivel óptico como equipamiento suficiente para el registro de PAF que garanticen la precisión del MDE esas escalas.

El presente trabajo tiene como objetivo principal generar información de base que permita comparar la exactitud y precisión obtenidas en productos topográficos elaborados a partir de imágenes capturadas mediante RPA, utilizando distintas metodologías de relevamiento de campo. Se pretende generar un insumo de utilidad para orientar la toma de decisiones metodológicas para futuros casos de aplicación de relevamientos topográficos de utilidad para gestión de recursos naturales y culturales, en áreas como la producción agropecuaria, la arqueología, la biología, la geografía física y el ordenamiento territorial.

2. Metodología

En los campos de la ciencia geográfica y la estadística, la exactitud de un sistema de medición representa el grado de acercamiento de las medidas de una cantidad al verdadero valor de esa cantidad. La precisión de un sistema de medición, se encuentra relacionado con la reproducibilidad y la repetibilidad; y se define como el grado en que la repetición de una medición en las mismas condiciones muestra los mismos resultados.

En este trabajo, la precisión y exactitud de los productos cartográficos se evaluaron tomando en consideración distintas metodologías de relevamiento de campo. Estas se definieron en base a:

- Colocación de distinta cantidad y forma de distribución de PAF.
- Medición de PAF con instrumentales diversos: GPS navegador, estación total (EETT), nivel óptico y cinta métrica.
- Relevamiento a distintas alturas de vuelo: 50 m y 100 m AGL (Arriba del Nivel del Suelo, del inglés, Above Ground Level).

El equipamiento utilizado para el trabajo de campo fue: una estación total Trimble 3506, un nivel óptico Pentax 30x, un GPS Navegador (GARMIN Etrex 30), un Drone DJI Phantom 4 con Tablet Samsung modelo SM-T595, y 15 Marcadores materializados con lonas impresas con diseño en cuadrantes blanco-rojo. El software utilizado para la planificación y realización de los vuelos fue Pix4D Capture. Para las restituciones fotogramétricas se utilizó Agisoft Metashape Professional versión 1.8.2, computadora con procesador (CPU) AMD Ryzen 7 5700G con Radeon Graphics, procesador gráfico (GPU) AMD Radeon(TM) Graphics (GFX90C) y NVIDIA GeForce RTX 3070, y 32 GB de memoria RAM.

2.1. Etapa de diseño

Los relevamientos se realizaron en el Campo Experimental del Centro de Investigación Docencia y Extensión en Producción Agropecuaria (CIDEPA) de la Universidad Nacional de Luján, que se ubica en el sector noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Allí se tomó un área de 18 hectáreas, en la cual se distribuyeron 15 Puntos de Control en el Terreno (PCT), para su utilización como PAF y como instancia de verificación de resultados.

Cabe destacar que la diferencia entre un PAF y un PCT radica que en los primeros se utilizan en el proceso de restitución fotogramétrica, en tanto que los PCT se utilizan para cuantificar las diferencias en la precisión entre los modelados y las mediciones realizadas directamente sobre el terreno. Estos puntos fueron localizados atendiendo a una lógica modular que permitieron generar doce diseños individuales de distribución de puntos que cubren los extremos y el centro del área a relevar, y distribuidos homogéneamente.

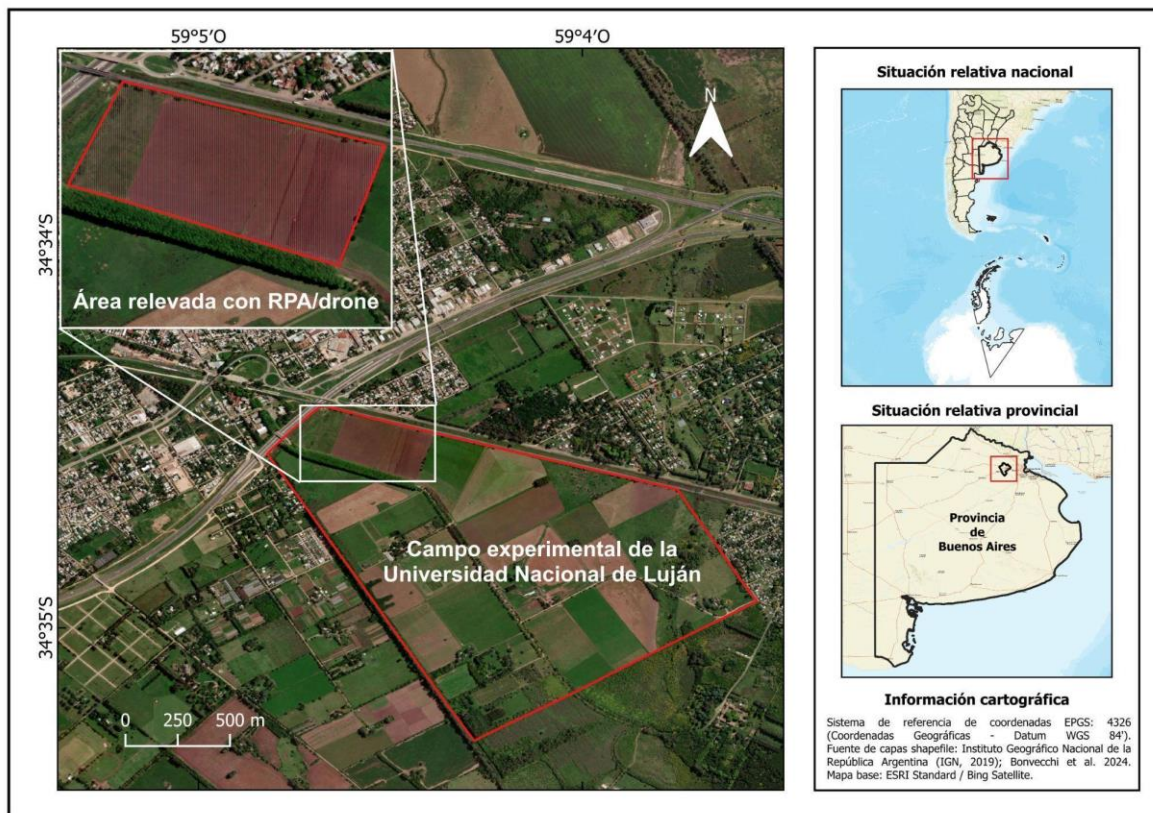


Figura 1. Ubicación del Campo Experimental del Centro de Investigación, Docencia y Extensión en Producción Agropecuaria (CIDEPA) de la Universidad Nacional de Luján, Argentina.

Fuente: elaboración de los autores en base a IGN (2019); Bonvecchi et al. (2024).

Estas localizaciones fueron establecidas en el software QGIS y luego cargadas en Navegadores GPS para su localización durante el trabajo de campo (Figura 2). Se observan dos tipos de Puntos: los “Marcadores” denominados de M1 a M12, y Estaciones de Relevamiento denominados A, B y C. Por otro lado se programaron los planes de vuelo utilizando la aplicación *PIX4D Capture* seleccionado la forma de grilla rectangular (*GRID MISSION*) del tipo 2D, y cubriendo una superficie mayor a la requerida para luego descartar el área de bordes. En base a los trabajos referidos en los antecedentes, se establecieron los siguientes parámetros:

Plan de vuelo 1: altura de vuelo 50 m AGL equivalente a un GSD (Distancia de muestreo del terreno, del inglés, Ground Sample Distance) teórico de 2,19 cm/píxel, un solapamiento de 75 % entre cámaras y un total de 2 vuelos (uno por cada batería disponible) de 11 y a 10 minutos de duración cada uno.

Plan de vuelo 2: altura de vuelo: 100 m AGL equivalente a un GSD teórico de 4,38 cm/píxel, un solapamiento de 75 % entre cámaras y una duración de 8 minutos.

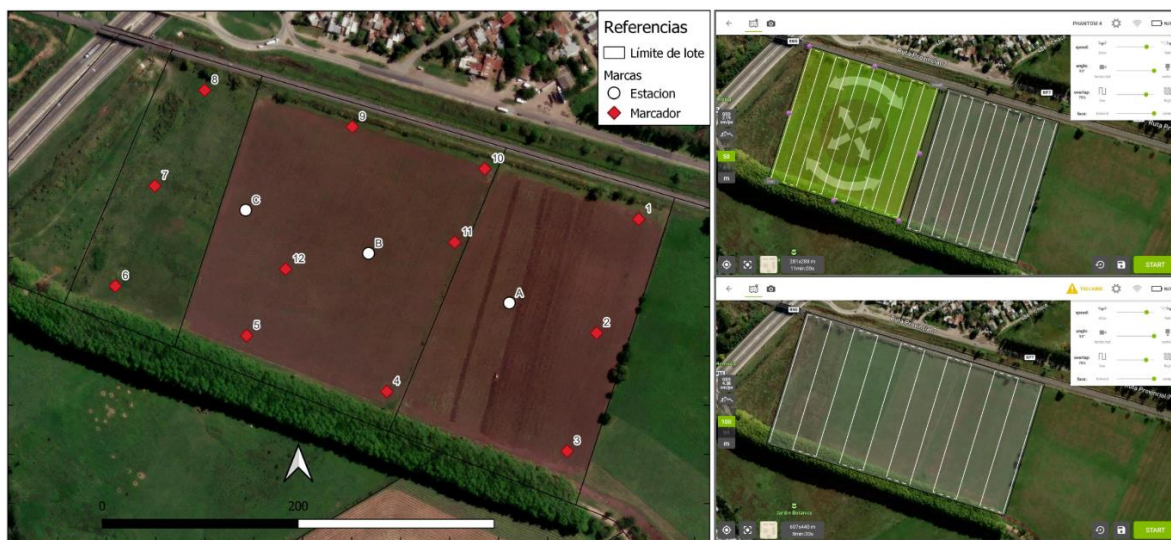


Figura 2. A la izquierda: Diseño en gabinete de la distribución de marcadores (en números) y estaciones de relevamiento (en letras) sobre una imagen satelital (Google Satellite en QGIS) del área de trabajo. A la derecha: capturas de pantalla de las misiones de vuelo programado a 50 m AGL (arriba) y a 100 m AGL (abajo), en el Software: Pix4D Capture.

Fuente: elaboración de los autores.

2.2. Etapa de trabajo de campo

El trabajo de campo se organizó en tres bloques. Un primer bloque consistió en la distribución en el terreno de los 12 marcadores y las 3 estaciones de relevamiento (15 PCT en total). Estos PCT se materializaron en el campo como lonas impresas con un diseño de cuadrantes en blanco y rojo con la indicación de un número en color negro, de 75 cm de

lado. La ubicación inicial de los mismos se estableció en base a los datos previamente cargados en el GPS navegador, y se fijaron con estacas en el suelo para evitar su movimiento debido al viento principalmente (Figura 3).



Figura 3. Contexto y equipamiento utilizado para el relevamiento de campo. Arriba a la izquierda: estación total; arriba a la derecha: nivel óptico; abajo a la izquierda: marcador; abajo a la derecha: *homepoint* con el dron previo al despegue.

Fuente: elaboración de los autores.

Un segundo bloque consistió en el registro de los datos planialtimétricos de cada uno de los marcadores. En primer lugar, se registraron los datos de altitud utilizando el nivel óptico, que implicó la utilización de las estaciones de relevamiento A y el traslado progresivo a las

estaciones B y C. También se tomaron medidas de distancia, aunque teniendo en consideración que serían de poca utilidad en la instancia de control habida cuenta el error de medición estándar de distancias con este equipo, que ronde de 0,5 a 1m.

Luego, posicionados en la Estación de relevamiento A, se midieron todos los marcadores con la EETT. Los datos planialtimétricos de los puntos así medidos se constituyeron en el marco de comparación para todas las evaluaciones de precisión y exactitud que veremos más adelante.

Finalmente, el tercer bloque de actividades de campo consistió en la realización de los vuelos planificados a 50 m y a 100 m AGL. Culminados los vuelos se retiraron los marcadores que estaban distribuidos en el terreno.

2.3. Etapa de procesamiento de información

Las imágenes capturadas con el RPA se procesaron en gabinete. Se generaron, a partir de restitución fotogramétrica, pares conformados por un MDE y su correspondiente ortofoto. Las restituciones se realizaron, en primer lugar, variando la cantidad y distribución de PAF, generando productos sin PAF, luego con 4 PAF y aumentando progresivamente hasta 15 PAF. Los datos de las coordenadas planialtimétricas se tomaron de aquellas registradas con EETT por un lado, y con el nivel óptico, por otro lado. Asimismo, se generaron pares de MDE-ortofoto a partir de las misiones vuelos realizadas a distinta altura. El modelo de flujo empleado para la restitución se basó en el Manual de Usuario de Agisoft (2022) con los ajustes específicos establecidos en Lanzelotti et al. (2025). Los datos se exportaron a una única planilla de cálculo. En el caso de las restituciones realizadas con datos de nivel óptico, se agregó al modelo de flujo, la aplicación de medidas de distancia entre marcadores (segmentos M1-M10; B-M12; M7-M6 y M10-M11) para ajustar los modelos en las coordenadas XY, en tanto que la coordenada Z se tomó directamente del dato de altitud registrado con el equipo.

Los pares MDE-ortofoto se exportaron en formato GEOTIFF para continuar con el tratamiento en un SIG (se utilizó el software QGIS Versión 3.34.9). Para el trabajo con coordenadas cartesianas, las capas se reproyectaron al Sistema de Referencia POSGAR 2007 - Faja 5. Se establecieron las coordenadas de cada marcador y modelado, y se exportaron a una planilla de cálculo (Chait y Lanzelotti, 2025). Luego se calcularon los errores residuales para cada una de las coordenadas X, Y y Z de los marcadores (C_{cal} por “Coordenadas calculadas”) para cada modelo respecto de las coordenadas medidas en terreno con la estación total (denominadas C_{obs} por “Coordenadas observadas”). También se calcularon los errores residuales para el promedio de XYZ en cada marcador, medido como la raíz cuadrada de la suma de los errores residuales de cada eje al cuadrado ($= \sqrt{(X_{cal} - X_{obs})^2 + (Y_{cal} - Y_{obs})^2 + (Z_{cal} - Z_{obs})^2}$).

A partir de éstos, se establecieron cuatro parámetros estadísticos de error: el error medio (EM), la raíz del cuadrado medio del error (RCME), la desviación estándar de los errores (DEE) y el error absoluto máximo (E_{max}), para cada uno de los ejes, y para el promedio XYZ (tomado de Jiménez-Jiménez et al. 2017). Y también se calcularon los errores planimétricos, medidos como la diferencia de distancias entre dos pares de marcadores medidos con EETT, y sus homólogos medidos en cada MDE generado por restitución (Figura 4).

$$EM = \frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})}{n} \quad (1)$$

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})^2}{n}} \quad (2)$$

$$DEE = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(C_{cal} - C_{obs}) - EM]^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$E_{max} = \max |C_{cal} - C_{obs}| \quad (4)$$

Figura 4. Fórmulas de las ecuaciones 1 a la 4 utilizadas para estimar la precisión de los modelos, donde: C_{cal} = coordenadas extraídas de los MDE en los PCT homólogos y C_{obs} = coordenadas de los PCT medidos con la estación total.

Fuente: Tomado de Jiménez-Jiménez et al. (2017).

Cabe destacar que el EM indica errores sistemáticos positivos o negativos, la RCME ilustra la dispersión de la distribución de frecuencias de los residuales y es sensible a valores altos de error, la DEE brinda información sobre la distribución de los residuales alrededor de la media y el $E_{\text{máx}}$ describe el residual de mayor magnitud en los datos (Jiménez-Jiménez et al. 2017). Asimismo, la DEE es también un indicador del error global y su valor indica que, asumiendo una distribución normal de los errores, el 68.27 % de los mismos se encuentran por debajo de la DEE indicada, 95.45 % por debajo de dos veces la DEE y 99.76 % por debajo de tres veces la DEE.

3. Resultados

3.1. Cantidad y distribución de puntos de apoyo fotogramétricos

Con la misión de vuelo efectuada a 50 ms AGL se obtuvieron 402 fotogramas que cubrieron una superficie de 19,3 hectáreas. Se produjeron 12 pares MDE-ortofoto con PAF cuya georreferenciación estuvo dada por los datos de la EETT, y 1 par MDE-ortofoto cuya georreferenciación estuvo dada por los datos del GPS navegador incluido en el RPA (denominado “sin PAF”). Se utilizaron los sufijos “a”, “b” para diferenciar distribuciones diferentes según una misma cantidad de PAF considerados. Todos los pares alcanzaron una resolución espacial en el MDE de 7,86 cm/pix, y en la ortofoto de 1.97 cm/pix, coherente con los datos de configuración del plan de vuelo (Figura 5).

Los diseños de cantidad y distribución de Marcadores para cada uno de los 12 pares de restitutiones se ilustran en la figura 5. La tabla 1 muestra los parámetros estadísticos obtenidos para los ejes X, Y y Z y el promedio de todos ellos.

Se observa así que en el MDE elaborado sin PAF, el EM es de 14.250 cm (142 m), y que con 4 PAF se obtienen resultados que pueden ser de 1.420 cm (14 metros) o del 21 cm de acuerdo a la forma de distribución de los marcadores. La forma de distribución que más se ajusta al terreno es la que contempla tres extremos y el centro del área relevada (modelado

4 PAF-b). A partir de la utilización de 5 PAF los resultados se ajustan progresivamente con una meseta en los resultados a partir de 8 y 9 PAF. En este último, el EM promedio alcanza valores muy cercanos al máximo obtenido. La mayor precisión corresponde al modelado con 15 PAF, donde el EM promedio se reduce a 5 cm. Este valor se descompone en 0,4 cm en el eje X, -0.8 en el eje Y, y 0,7 cm en el eje Z (Figuras 5 y 6).

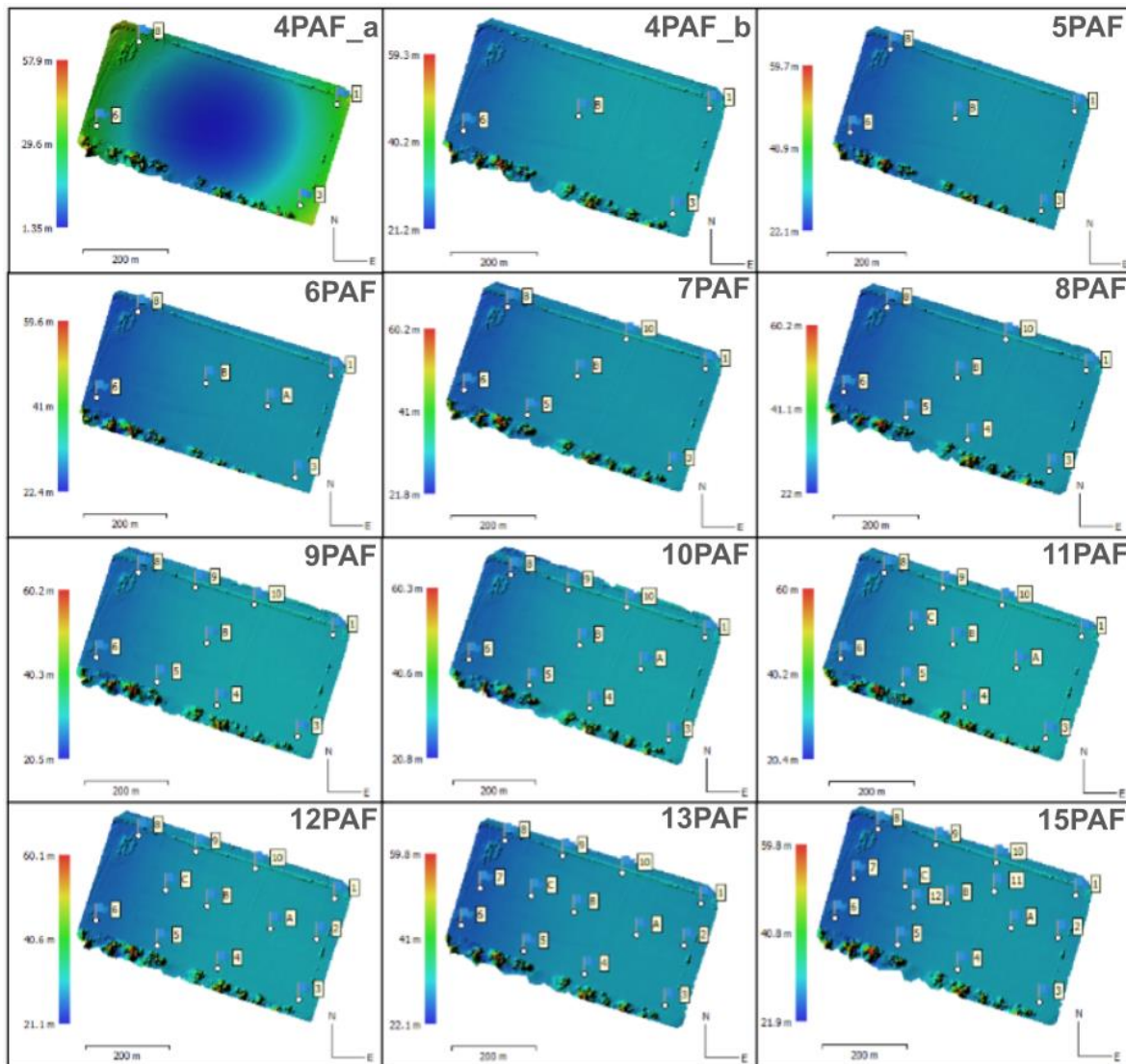


Figura 5. Restituciones fotogramétricas mostrando cantidad y distribución de los marcadores utilizados en cada uno.

Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 1. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, E_{máx}) de cada una de las restitutiones fotogramétricas realizadas a partir de EETT, en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ.

Eje	Medidas (cm)	sin PAF	4 PAF_a	4 PAF_b	5 PAF	6 PAF	7 PAF	8 PAF	9 PAF	10 PAF	11 PAF	12 PAF	13 PAF	15 PAF
X	EM	96,3	-1,7	-8,4	-5,8	-7,3	-2,7	-1,1	1	-0,2	0,3	0,2	0,1	0,4
	RCME	160,1	57,9	12,8	10	11,2	6,2	5	3,7	3,9	3,7	3,5	3,9	3,3
	DEE	132,4	59,9	10	8,4	8,7	5,8	5,1	3,6	4	3,8	3,6	4	3,4
	E _{máx}	333,9	107,3	28,3	23,4	23,1	16,1	14,2	9	8,4	8,5	7,8	7,8	7,2
Y	EM	-64,8	2,6	1,6	-2,4	-3,8	-1,4	0,7	-2,2	-2,1	-0,7	-0,2	-0,6	-0,8
	RCME	104,5	44,7	16,6	12,1	10,7	8,2	6,6	6,4	6,1	5,5	4,9	4,9	4,4
	DEE	84,8	46,2	17,1	12,3	10,4	8,4	6,8	6,3	5,9	5,7	5	5,1	4,5
	E _{máx}	184,2	107,2	31	23,2	23	18,3	15,9	14,3	14,4	12,6	11,6	11,8	9,6
Z	EM	-14249,5	-1417,4	-8,6	-4,6	-3,5	-2,7	-0,3	-0,7	0,4	1,1	0,6	0,7	0,7
	RCME	14249,6	1761,7	16,9	13,9	14,1	8,7	3,3	2,8	3,3	3	2,5	1,7	1,8
	DEE	51,6	1083	15	13,5	14,1	8,5	3,4	2,8	3,3	2,8	2,5	1,6	1,7
	E _{máx}	14337,8	2792,2	38,4	42,3	41,2	31,2	8,2	9,7	8,5	7,9	7,1	3,7	3,9
Promedio XYZ	EM	14250,8	1420,3	21,1	15,5	15,7	10,2	7,7	6,9	7	6,5	5,8	5,9	5,2
	RCME	14250,9	1763,2	26,9	20,9	20,9	13,5	9	7,9	7,9	7,3	6,5	6,5	5,8
	DEE	50,5	1081,6	17,3	14,5	14,3	9,2	4,8	4	3,8	3,5	3,1	2,8	2,6

Fuente: Elaboración de los autores en base a Chait y Lanzelotti (2025).

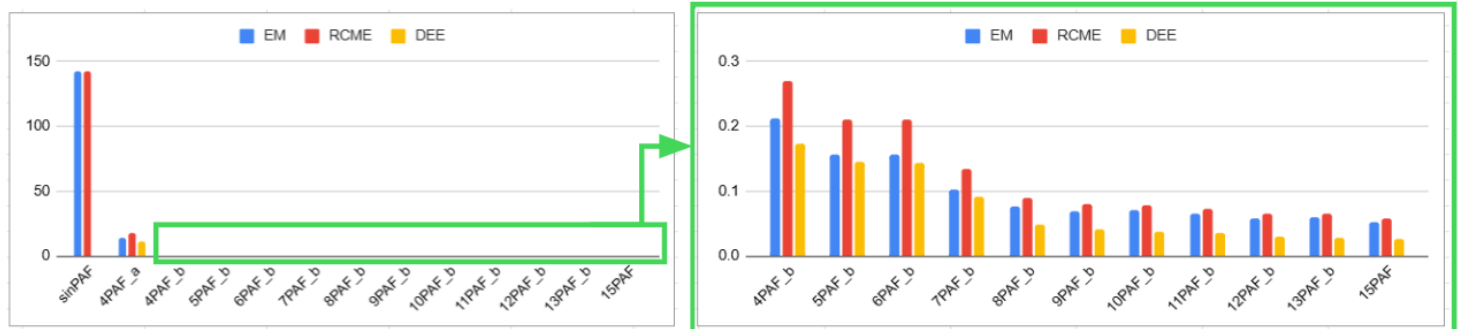


Figura 6. Detalle de errores estadísticos (EM, RCME y DEE) de cada uno de los modelos cartográficos según cantidad y distribución de PAF registrados con EETT, ordenados de mayor a menor EM promedio.

Fuente: elaboración de los autores.

3.2. Altura de vuelo

Con la misión efectuada a 100 m AGL se obtuvieron 120 fotogramas que cubrieron una superficie de 24,5 hectáreas. Se generó por restitución un par MDE-ortofoto utilizando 15 PAF georreferenciados según datos de la EETT que arrojó una resolución en el MDE de 16 cm/pix; y en la ortofoto una resolución de 3.99 cm/pix. Estos resultados se utilizaron para comparar con los obtenidos a 50 m AGL, presentados en el apartado anterior, comparando restituciones realizadas en ambos casos con 15 PAF.

La tabla 2 muestra los cálculos estadísticos obtenidos según la altura de vuelo. Se observa así, que el EM promedio de las coordenadas XYZ es de 5,23 cm en el modelado generado a partir de imágenes capturadas a 50 m AGL, y de 6,04 cm en el modelado generado con imágenes capturadas a 100 m AGL. La diferencia entre ambos modelados es menor a 1 cm, a pesar de la diferencia en el tamaño de píxel, que se duplica entre un modelado y otro (16 cm a 100 AGL y 7.86 cm a 50 AGL).

Comparando la resolución de las ortofotos, se observa que a 50 m AGL se obtienen píxeles de 1,97 cm, y de 3,99 cm (casi el doble) en el modelado a 100 m. Esto produce, en el segundo caso, márgenes más difusos en la identificación de formas (Figura 7). En términos cualitativos, se observa una menor utilidad relativa en estas últimas.



Figura 7. Detalle del marcador M2 visto en la ortofoto generada a partir de misiones de vuelo realizadas a diferente altura: Izquierda: 50 m AGL; Derecha: 100 m AGL.

Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 2. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, $E_{\max}$) en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ correspondientes a los MDE realizados a partir de vuelos a 50 m y a 100 m AGL.

Eje	Mediciones (cm)	50 m AGL	100 m AGL
X	EM	0,45	-0,95
	RCME	3,27	3,98
	DEE	3,35	4
	$E_{\max}$	7,2	7,5
Y	EM	-0,75	-0,12
	RCME	4,42	4,04
	DEE	4,51	4,18
	$E_{\max}$	9,6	-8
Z	EM	0,65	-1,48
	RCME	1,81	3,4
	DEE	1,75	3,17
	$E_{\max}$	3,85	-9,17
Promedio XYZ	EM	5,23	6,04
	RCME	5,79	6,84
	DEE	2,58	2,78

Fuente: Elaboración de los autores.

3.3. Instrumental de medición

Los resultados de la restitución fotogramétrica de imágenes utilizando puntos acotados con nivel óptico, tanto a 50 como a 100 m AGL se diferenciaron según el procedimiento utilizado. La tabla 3 muestra los cálculos estadísticos obtenidos según el instrumental utilizado, y según altura de vuelo.

Tabla 3. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, $E_{\max}$) en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ correspondientes a los MDE realizados a partir de vuelos a 50 m y a 100 m AGL con 15 PAF medidos según EETT o nivel óptico con y sin escalado de distancias.

Eje	Medidas (cm)	50 m AGL con EETT	50 m AGL con Niv.Op.	50 m AGL con Niv.Op. y escalado	100 m AGL con EETT	100 m AGL con Niv.Op.	100 m AGL con Niv.Op. y escalado
X	EM	0,45	95,51	94,87	-0,95	179,61	194,99
	RCME	3,27	159,09	97,95	3,98	195,91	329,09
	DEE	3,35	131,7	25,23	4	81	274,4
	$E_{\max}$	7,2	333,4	143,3	7,5	326,1	601,5
Y	EM	-0,75	-66,27	-60,46	-0,12	-246,92	-260,51
	RCME	4,42	105,83	71,22	4,04	273,09	294,4
	DEE	4,51	85,41	38,96	4,18	120,75	141,93
	$E_{\max}$	9,6	-183,3	-155,2	-8	-434,1	-494,6
Z	EM	0,65	-1,64	-0,56	-1,48	-2,07	-1,64
	RCME	1,81	2,46	2,16	3,4	3,47	3,17
	DEE	1,75	1,89	2,16	3,17	2,88	2,81
	$E_{\max}$	3,85	-4,26	-6,09	-9,17	-9,32	-6,3
Promedio XYZ	EM	5,23	170,93	115,74	6,04	326,99	418,74
	RCME	5,79	197,8	125,37	6,84	347,91	457,06
	DEE	2,58	88,44	36,96	2,78	80,51	145,05
Distancias XY	EM	3,1	-218,2	-11,78	2,47	-386,85	-11,7
	RCME	4,17	240,38	20,04	3,36	428,9	36,46
	DEE	4,23	278,18	23,14	4,05	495,78	42,24
Promedio (XY),Z	EM (XY)Z	3,17	218,21	11,79	2,88	386,86	11,81

Fuente: Elaboración de los autores.

En primer lugar, se utilizaron las coordenadas X e Y correspondiente al GPS navegador y se reemplazó la coordenada Z del mismo por el dato registrado con nivel óptico. De este modo, las coordenadas X e Y arrojaron un EM de 95,87 cm y -66,27 cm respectivamente (vuelo a

50 m AGL) y de 179,61 cm y -246,92 cm respectivamente (vuelo a 100 m AGL). En el eje Z se obtuvo un EM de -1,64 cm (vuelo a 50 m AGL) y -2,07 cm (vuelo a 100 m AGL). Se observa que, comparado con los datos obtenidos de la restitución con EETT, las diferencias en el eje X son casi 20 mayor, en el eje Y van de 10 a 20 veces mayor, en tanto que en el eje Z la diferencia es de sólo 1 cm y 0,5 cm en cada caso. En síntesis, hay precisión y exactitud en el eje Z (el dato medido con nivel óptico), pero se sostendrá el error estándar del GPS navegador en los ejes XY.

Cuando se utilizaron medidas de distancia entre marcadores para escalar el modelado en sus ejes XY, el resultado cambió. Los datos referentes al eje Z mejoran en exactitud, reduciendo el error a 1 mm. Sin embargo, se registra también una baja en la exactitud general de los productos modelados del orden de los 115,74 cm y 418,74 de EM promedio a 50 m AGL y 100 M AGL respectivamente. Respecto a la precisión interna del modelado (es decir, la relación interna de proporciones entre los ejes X, Y y Z del modelado), el EM tiene alcanza un valor de poco más de 11 cm ya sea a 50 m o a 100 m AGL, que es un muy buen resultado. Esto es el resultado del desplazamiento en los ejes XY que no implica deformación sino traslación y/o rotación en estos ejes.

4. Conclusiones

La precisión y exactitud de los productos cartográficos es una aspiración que motiva los avances en geotecnologías. Sin embargo, son los objetivos que orientan la utilización de la cartografía lo que, en última instancia, determinan los umbrales de error tolerables, los cuales varían en función de la disciplina, el tipo de análisis y la escala de implementación.

En la actualidad, los levantamientos topográficos de pequeña y mediana escala recurren cada vez con mayor frecuencia al empleo de drones, buscando minimizar costos de tiempo, dinero y recursos humanos, al mismo tiempo que aumentan la calidad y precisión de los resultados, como hemos detallado en los antecedentes. Sin embargo, se reafirma la

necesidad de contar con puntos de control en el terreno para garantizar la validez de los productos, aun cuando se utilicen equipos con tecnología RTK o PPK.

El presente trabajo comparó diferentes metodologías de levantamiento topográfico con RPA, con el propósito de ofrecer un marco de referencia útil para la planificación del trabajo de campo. Los resultados son de aplicación potencial en diversos ámbitos vinculados con la gestión de recursos naturales y culturales, la producción agropecuaria, la arqueología, la biología, la geografía y el ordenamiento territorial.

Respecto a la cantidad y distribución de PAF, los modelos generados sin puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), basados únicamente en el GPS del RPA, presentan errores de precisión y exactitud en los tres ejes. Esto, en especial en el eje Z, siendo del orden de los 2-3 m en los ejes XY, y de 140 m en el eje Z (coherentes con los errores de un GPS navegador). Aunque la ortofoto asociada puede presentar buena información sobre los objetos presentes en la superficie terrestre, esto último dependiendo de la altura de vuelo, desaconsejamos su utilización como modelos topográficos.

En cambio, la incorporación de entre 4 y 7 PAF redujo considerablemente los errores a valores entre 21 y 10 cm progresivamente en los tres ejes. Sin embargo, una distribución inadecuada de los PAF conlleva también deformaciones notables (en nuestro caso, véase el modelado 4PAF-a y 4PAF-b). A partir de 8 a 15 PAF los errores descendieron a entre 7 y 5 cm. Estos últimos son la mitad del tamaño del píxel del MDE y 2 veces el tamaño del píxel del ortomosaico. Estos niveles de precisión permiten realizar cálculos de altitud, distancias, y volúmenes en forma confiable, como así también sus productos derivados (pendiente, sombreado, orientación, curvatura, etc.) a todas las escalas de representación espacial. El tiempo que insume distribuir 5 marcadores en el terreno, o distribuir 9-10 marcadores es prácticamente el mismo, pero el tiempo que insume la medición de los mismos variará en función del equipamiento utilizado.

Respecto a la altura de vuelo, la comparación entre vuelos a 50 m y 100 m AGL mostró que la diferencia en la precisión de los MDE es menor a 1 cm. Aunque la calidad de las ortofotos difiere notablemente. Su utilidad depende de la disciplina de aplicación del modelado. Una menor altura de vuelo favorece la definición de rasgos morfológicos finos, mientras que una mayor altura implica ventajas operativas: reducción del tiempo de campo, menor consumo de baterías y menor carga de procesamiento en gabinete y de recursos informáticos necesarios para la restitución fotogramétrica. La elección, por lo tanto, debe responder a la escala de análisis requerida y al tipo de información necesaria para el diagnóstico territorial.

Respecto al equipamiento de registro de PAF, la precisión medida con EETT o con nivel óptico, no muestra diferencias sustanciales en el eje Z. Aunque, sí se observa una disminución en la precisión en los ejes X e Y. Esto deriva del error estándar del GPS navegador en estos ejes. Para que los modelados que resultan de la restitución fotogramétrica de PAF medidos con nivel óptico sean de alta precisión, deben ser escalados, tomando medidas de distancias entre marcadores durante el trabajo de campo. Con este procedimiento se aumenta considerablemente la precisión interna del modelado. Considerando que ésta constituye una buena alternativa de bajo costo, para el trabajo con modelos que no requieren exactitud geodésica pero sí alta consistencia interna. Otra diferencia deviene del tiempo que demanda el registro con EETT respecto del registro con nivel óptico, siendo el primer instrumento, más eficiente.

En síntesis, la incorporación de 5 a 7 PAF implica un EM de 15,5cm 10,2 cm, siendo suficiente para las aplicaciones a escalas 1:500 en adelante. De 8 a 15 PAF se reduce el EM de 7,5 a 5,2 cm, siendo útiles para todas las escalas de representación cartográfica. La altura de vuelo impacta poco sobre la precisión del MDE, pero afecta la identificación de formas en la ortofoto. La exactitud geodésica medida con EETT o con nivel óptico escalado con medidas de distancia para este tipo de relevamientos arroja resultados dispares, sin embargo, la precisión de ambos productos muestra una fuerte coherencia al interior de ambos modelados, resultado útil para la mayoría de las aplicaciones.

Las alternativas para la obtención de modelos topográficos ofrecen un abanico que va desde equipamientos de bajo y alto costo (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor transportabilidad del instrumental (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor tiempo de trabajo de campo (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor cantidad de tiempo de trabajo de campo (menor o mayor altura de vuelo respectivamente), mayor o menor precisión y/o exactitud alcanzados (variando cantidad y distribución de PAF en terreno y combinando las variables anteriores). La combinación de variables —cantidad y distribución de PAF, tipo de instrumental, altura de vuelo y procedimientos de medición— permite ajustar los relevamientos según los recursos disponibles y el nivel de exactitud requerido, garantizando una gran flexibilidad de aplicación.

Desde la perspectiva de la Geografía Aplicada y el ordenamiento territorial, los aportes de este estudio trascienden el plano técnico. La generación de información espacial precisa y adaptable se convierte en una herramienta estratégica para diagnosticar procesos territoriales, identificar potenciales conflictos de uso del suelo, delimitar áreas de riesgo o vulnerabilidad ambiental, y fundamentar políticas públicas orientadas a la gestión sostenible. Además, el acceso a metodologías que pueden ajustarse a distintas condiciones económicas y técnicas favorece la democratización de los insumos cartográficos, fortaleciendo la capacidad de decisión de gobiernos locales, instituciones académicas y actores sociales.

Por último, el uso de RPA en relevamientos topográficos no solo mejora la calidad y eficiencia de los productos cartográficos, sino que también constituye un insumo clave para la planificación territorial. Al vincular los avances tecnológicos con la gestión de los recursos naturales y culturales, este trabajo reafirma el rol de la Geografía Aplicada como disciplina puente entre la innovación técnica y la construcción de territorios más equilibrados, resilientes y sostenibles.

6. Agradecimientos

El trabajo de campo contó con la colaboración del Ing. Agr. Marcos A. Reche (selección de lotes), Karen Casenave (registro de imágenes oblicuas con drone) y Federico Gauna (coloración de marcadores en terreno). La investigación se realizó con el apoyo del Instituto de las Culturas (UBA-CONICET) y del LabSIG-PRODISEG de la Universidad Nacional de Luján, en el marco del proyecto UNLu-PIA-2023-005.

7. Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés. Así mismo, los autores de este artículo nos responsabilizamos del contenido del mismo, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

8. Referencias

- Bonvecchi, V. E., Bulos, L., Irigoin, J., Montes Galbán, E., Petrasek, M.R., Ramírez, J. de los A., Reche, M. A., Tenti Vuegen, L., Trabichet, F., y Wagner, M. V. (2024). *Capas de información geográfica. Campo experimental de la Universidad Nacional de Luján* [Data set]. <https://www.cidepa.unlu.edu.ar/?q=node/40>
- Buzai, G. D. (1999). *Geografía global*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G. D. (2001). Paradigma geotecnológico, geografía global y cibergeografía, la gran explosión de un universo digital en expansión. *GeoFocus*, 1, 24–48. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/313>
- Chait, F. N. y Lanzelotti, S. L. (2025) Datos de base y errores estadísticos (EM, RCME, DEE, Emáx) calculados para cada Punto de Apoyo Fotogramétrico registrado en el Centro de Investigación, Docencia y Extensión Agropecuaria de la Universidad Nacional de Luján. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (dataset). <http://hdl.handle.net/11336/272320>

- Domínguez Pérez, C. y Martínez González, J. (2019). El uso de drones en la investigación arqueológica: Fotogrametría y productos derivados. *Cuadernos del Sur*, 24(4), 72–89. <https://doi.org/10.4067/S0717-73562021005001902>
- Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina [IGN]. (2019). *Capas SIG*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., Flores-Velázquez, J., Marcial-Pablo, M. J. y Robles-Rubio, B. D. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85–100. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.007>
- Lanzelotti, S. L., Chait, F. N., y Lamamí, M. A. (2025). Evaluación de la precisión planialtimétrica de productos cartográficos basados en la utilización de RPA/drone aplicado a sitios arqueológicos. *Comechingonia. Revista de Arqueología*, 29(3), 307–329. <https://doi.org/10.37603/2250.7728.v29.n3.48020>
- Moreno Jiménez, A. (2013). Entendimiento y naturaleza de la cientificidad geotecnológica: Una aproximación desde el pragmatismo epistemológico. *Investigaciones Geográficas*, 60, 5–36. <https://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.01>
- Novara, M. y Jacamo, E. (2020) Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para la generación de Modelos Digitales Superficies de alta resolución. Aportes metodológicos sobre las distintas alturas de vuelo. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)* 17(I): 1-18.
- Reche, M. A. (2024). *Estudio de caso para la evaluación de precisiones obtenidas en relevamientos topográficos utilizando VANT: Navegador GPS vs. puntos de apoyo fotogramétrico*. Trabajo final de Especialización. Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio del medio ambiente de la Universidad Nacional de Luján. <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/2780>

Santecchia, G. S., Neuman, K. R. y Span, J. M. (2023). Mejora de la Exactitud Altitudinal de los MDS Generados con VANT incorporando PAF en altura. *Revista especializada en Ingeniería y Ciencias de la Tierra* 3(1): 8-25. <https://doi.org/10.48204/reict.v3n1.3947>