

Accuracy of the digital terrain model (DTM), considering the number of ground support points in a photogrammetric survey applied on the Pampa Grande - Tablazos highway, Chiclayo Province

Julio Ronaldo Idrogo Livaque, Br.¹, Germán Sagástegui Vásquez, Mg. Ing.²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, n00025366@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, german.sagastegui@upn.pe

Abstract– The present study evaluates the accuracy of the digital terrain model (DTM) regarding the number of control points (“P.A.”) in a photogrammetric survey with a drone, applied on the road between Pampa Grande and Tablazos, with 8917 meters of development, in the province of Chiclayo, Peru. The “P.A.” number determines the accuracy of each processed model, from the photo orientation phase; affecting the other deliverables generated, such as the DSM (digital surface model), DTM and orthophotography. It started with 0 P.A. in Model No. 1, up to 141 P.A. in Model No. 15. The number of check points (“P.C.”) that were used to verify the precision was 27. After processing the data with statistical software, it is concluded that, for the design of the photogrammetric survey project and the methodology followed, 7 “P.A.”/km are needed to achieve accuracy of the DTM in valid margins. Of the processed models, they are valid from Model No. 8. From this model the "surface" was generated starting from the DTM, in Autodesk Civil3D, where the contour lines were created with excellent detail, remaining as a canvas for the design of civil projects.

Keywords: Photogrammetry, drone, DTM, road, precision.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.300>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Precisión del modelo digital de terreno (MDT), considerando el número de puntos de apoyo terrestre en un levantamiento fotogramétrico aplicado en la carretera Pampa Grande - Tablazos, Provincia de Chiclayo

Julio Ronaldo Idrogo Livaque, Br.¹, Germán Sagástegui Vásquez, Mg. Ing.²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, n00025366@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú, german.sagastegui@upn.pe

Resumen– El presente estudio evalúa la precisión del modelo digital de terreno (MDT) respecto al número de puntos de apoyo terrestre (P.A.) en un levantamiento fotogramétrico con dron, aplicado en la carretera que une Pampa Grande y Tablazos, con 8917 metros de desarrollo, en la provincia de Chiclayo, Perú. El número de P.A. determina la precisión de cada modelo procesado, desde la fase de orientación de fotografías; afectando a los demás entregables generados, como el MDS (modelo digital de superficie), MDT y ortofotografía. Se partió con 0 P.A. en el Modelo N° 1, hasta 141 P.A. en el Modelo N° 15. El número de puntos de control (P.C.) que se usaron para verificar la precisión fue de 27. Luego de procesar los datos con software estadístico, se concluye que, para el diseño de proyecto de levantamiento fotogramétrico y la metodología seguida, se necesitan 7 P.A./km para lograr precisión del MDT en márgenes válidos. De los modelos procesados, son válidos a partir del Modelo N° 8. De este modelo se generó la “superficie” partiendo del MDT, en Autodesk Civil3D, donde se crearon las curvas de nivel con excelente detalle, quedando como lienzo para el diseño de proyectos civiles.

Palabras clave: Fotogrametría, dron, MDT, carretera, precisión.

I. INTRODUCCIÓN

Los VANT (vehículos aéreos no tripulados) han tomado importancia en los proyectos de ingeniería y en la industria de la construcción en general, gracias a que pueden capturar fotos de alta resolución que sirven para ser procesadas luego por software especializado y dar como resultado modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT), nubes de puntos georreferidas y ortomosaicos (Torrado et al., 2016). Los levantamientos fotogramétricos pueden llegar al 95% de precisión respecto del levantamiento topográfico convencional [1].

Solis (2016) [2] concluye que al usar fotogrametría con drones se invierte el 58.3% de recursos económicos de la cantidad que se invertiría en un levantamiento topográfico convencional, con estación total.

Sobre los entregables generados con la técnica de

fotogrametría con drones, se pueden realizar mediciones cartográficas de precisión, sin necesidad de exponer al personal a entornos hostiles o peligrosos [3].

Los estudios anteriormente citados garantizan que la fotogrametría con drones es precisa, lo que concuerda con los resultados de la presente investigación. La aplicación de fotogrametría aérea con drones para proyectos de carreteras es completamente viable y ofrece múltiples ventajas. Es así que, Gonzáles & Castañeda (2019) [4] refieren que, con mayor cantidad de información en los entregables, se consigue mayor versatilidad para la toma de decisiones; lo que es útil en casos como la variación del trazo geométrico de una carretera.

Para hacer fotogrametría con drones sin un sensor GNSS (RTK, PPK) se requieren puntos de apoyo terrestre, los que sirven para realizar la escala y la orientación espacial del modelo fotogramétrico producido. A la fecha de la presente investigación, no existió un documento que sugiera cuántos puntos de apoyo usar por cada kilómetro de vía levantada, para obtener la precisión requerida y válida. En el desarrollo de este artículo, se explica la metodología seguida, los parámetros que se tomaron en cuenta y los resultados obtenidos; ilustrando al lector, con tablas y gráficos, cómo es que varía la precisión al aumentar el número de puntos de apoyo terrestre.

II. METODOLOGÍA

A. Instrumentos físicos.

- Dron. Se ocupó una unidad del modelo Phantom 4 Pro, marca DJI (Sin receptor RTK/PPK).
- Receptores geodésicos GNSS. El equipo usado fue un kit base-rover de la marca CHCNAV, modelo i90.
- iPad. Sistema operativo iPadOS 14, para soportar el software de planificación de vuelo.
- Computadora: Se ocupó un equipo con las siguientes características:

CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz,
RAM: 32GB, GPU: NVIDIA GeForce GTX 750 Ti
(8GB).

B. Software.

- Map Pilot Pro. Software móvil de planificación de vuelo, instalado en la tablet iPad. Permite planificar los vuelos fotogramétricos siguiendo la altimetría de la zona.
- DJI Go 4. Software controlador del dron Phantom 4 pro, usado para calibrar sensores como el IMU, compass, entre otros.
- Pix4D Mapper Pro. Software de procesamiento fotogramétrico.
- Global Mapper. Se usó para para generar los modelos digitales de superficie (MDS), exportar nubes de puntos, extraer valores de elevación, clasificar nubes de puntos y exportar archivos en diversos formatos.
- Recap (Autodesk). Utilizado para la eliminación de puntos no deseados de la nube, para luego exportarlos a Civil 3D.
- Civil 3D (Autodesk). Software que recibe la nube se puntos de Recap y genera una superficie, que viene a ser el MDT. Aquí también se generan los entregables finales en formato de planos, destacando las curvas de nivel.
- ArcGis. Para edición de planos de: ubicación, MDS y MDT.
- Statgraphics. Software de procesamiento estadístico.

C. Planificación.

Delimitación del terreno a levantar:

Se tomó 100 metros a cada lado de la vía.
Distancia total de la vía a levantar: 8.92 km.
Área de interés: 205.69 Ha.

En la figura 1 se observa, resaltada en color verde, el área de interés delimitada.



Fig. 1 Delimitación de zona de proyecto.

Definición de ubicación tentativa de puntos de apoyo y puntos de control:

Se ubicaron los puntos de apoyo y puntos de control en Google Earth. Luego, se obtuvieron las coordenadas de esos puntos, para materializarlos en campo. Los puntos definidos se aprecian en la figura 2, donde se observa que se distribuyen a lo largo de toda el área de interés.

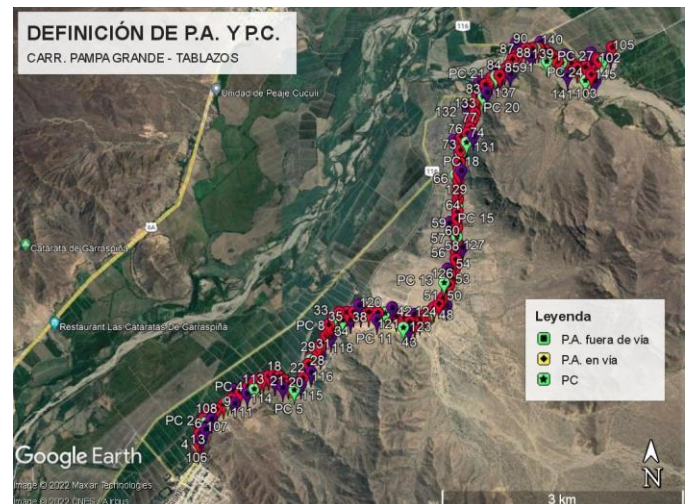


Fig. 2 Ubicación tentativa de P.A. y P.C.

Los puntos en vía se proyectaron, aproximadamente, cada 100 metros. Los puntos fuera de vía se ubicaron de acuerdo a la geografía, en cimas y valles.

Cantidad de puntos de apoyo: 141.
Cantidad de puntos de control: 27.

Parámetros de vuelo:
Altura desde el suelo: 100 m.

GDS (distancia de muestreo del suelo): 2.74 cm/px.
 Traslape frontal entre fotografías: 80%.
 Traslape lateral entre fotografías: 75 %.
 Total de planes de vuelo: 9.

La visualización típica de un plan de vuelo en el software móvil Map Pilot Pro es como se presenta en la figura 3.



Fig. 3 Plan de vuelo N° 1, con seguimiento de altimetría de terreno.

D. Ejecución en campo.

Se materializaron los puntos de apoyo y control terrestre, construyendo una diana en forma de “L”, usando yeso y escribiendo el número de punto. La toma de coordenadas se realizó en el vértice de la diana fotogramétrica. La figura 4 muestra la forma y la toma de coordenadas de la diana número 100.



Fig. 4 Toma de coordenadas con equipo GNSS.

Seguidamente, fueron ejecutados los planes de vuelo, siguiendo el orden, del “Plan 1” al “Plan 9”. El total de fotografías recopilado fue de 3419. En la figura 5, la línea de color naranja simboliza la ruta que fue seguida por el dron al finalizar el plan de vuelo.

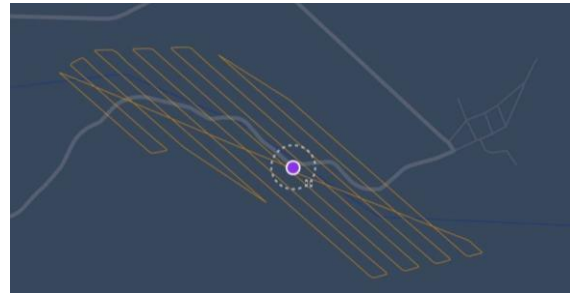


Fig. 5 Ejecución de un vuelo fotogramétrico. Segundo vuelo del “Plan 9”.

E. Procesamiento de datos en gabinete.

Para el presente trabajo, la ruta de procesos adoptada fue la siguiente:

- Procesamiento Inicial, en Pix4D.
- Selección de los puntos de apoyo a usar, según el número de modelo.
- Reoptimización de orientaciones. Se repite este paso, cargando puntos de apoyo adicionales, según el número que se requiera para cada modelo.
- Obtención de los reportes de calidad del procesamiento. En esta parte, los datos más importantes son los errores medios cuadráticos existentes en los ejes X, Y y Z.
- Análisis estadístico, en Statgraphics. Aquí se halla la línea de tendencia y la ecuación que describe el comportamiento de los datos.
- Generación de Nube de Puntos densificada, en Pix4D.
- Generación de Ortomosaico, en Pix4D.
- Generación de MDS, en Goba Mapper.
- Comparación de coordenadas MDS con coordenadas de GNSS (proceso opcional), en Global Mapper.
- Obtención de MDT de área seleccionada, Autodesk Recap.
- Generación de curvas de nivel y planos topográficos, Autodesk Civil 3D.

La conexión y secuencia entre pasos de la metodología, observa en el mapa de la figura 6.

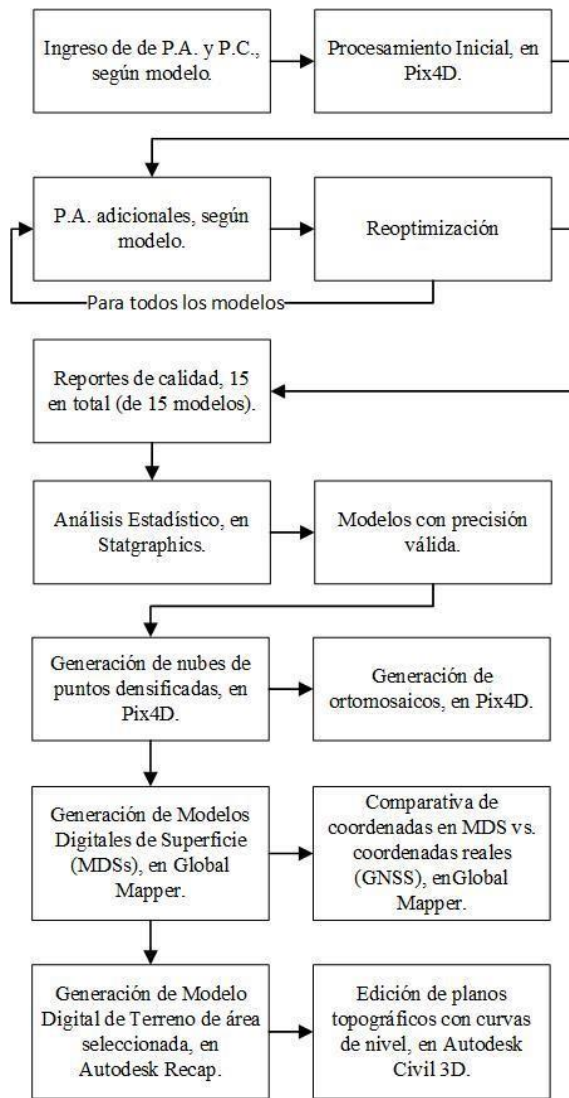


Fig. 6 Diagrama de flujo de procesos, para procesamiento en gabinete.

Básicamente, en el procesamiento inicial se tienen disponibles las configuraciones “completa” y “rápida”.

Si bien la opción “completa” brinda mucho más detalle y con esta opción se tiene más precisión con menor número de puntos de apoyo, el presente estudio se hizo con la configuración “rápida”, por ser más asequible a la mayoría de usuarios. Aquí, las fotografías se escalan a ¼ de su tamaño (largo y ancho).

El paso “P.A. adicionales, según modelo” (observar Fig. 6) se hace luego de procesar el Modelo N°1 como un modelo virgen, sin puntos de apoyo. La tabla 1, muestra el número de puntos de apoyo usados en cada modelo procesado.

TABLA 1
NÚMERO DE PUNTOS DE APOYO TERRESTRE (P.A.) USADOS EN CADA MODELO PROCESADO

MODELO	N° DE P.A.
1	0
2	3
3	5
4	10
5	15
6	20
7	30
8	40
9	50
10	60
11	70
12	80
13	100
14	120
15	141

Del modelo 2 al modelo 15, se han insertado en el programa los puntos de apoyo necesarios y se ha calculado las orientaciones mediante “reoptimización”.

El dron usado no cuenta con módulo RTK o PPK, por lo que la orientación de cámaras se realizó de forma semi manual, dando clic en el punto de interés de 3 o 4 fotografías y eligiendo luego la opción de “marcador automático”, en Pix4D Mapper. La figura 7 muestra el la marca en la diana número 38, en diferentes fotografías.

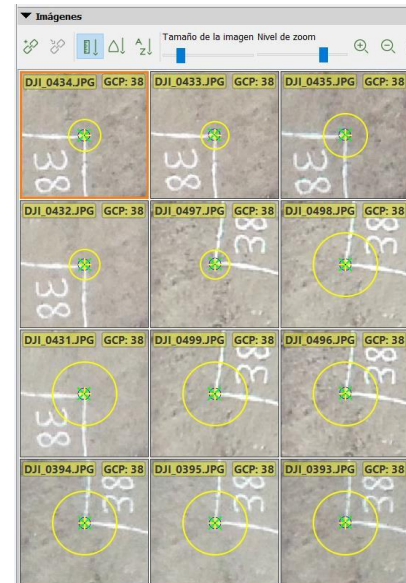


Fig. 7 Ubicación manual del vértice de la diana fotogramétrica, donde se tomaron las coordenadas del P.A. Se visualiza el caso del P.A. N° 38 (de 141).

Finalizada la reoptimización de orientaciones de las fotografías, termina el “procesamiento inicial” de Pix4D con la

generación del Reporte de Calidad, donde los datos que se obtuvieron son los RMS en X, en Y y en Z (tabla 2). Dichos RMS se calculan automáticamente en Pix4D al ingresar los puntos de control (P.C.), que el programa denomina “check points (CP)”. Los P.C. son puntos que no ingresan en el procesamiento de los modelos, solo sirven para comparar la coordenada de un punto, calculada por Pix4D; respecto de la coordenada real, tomada con el equipo GNSS.

TABLA 2
ERRORES MEDIOS CUADRÁTICOS DE CADA MODELO, RESPECTO A LOS PUNTOS DE CONTROL

RMS RESPECTO A LOS PUNTOS DE CONTROL (P.C.)				
MODELO	CTD. P.A.	RMS (m)		
		X	Y	Z
1	0	1.961122	1.918483	40.109177
2	3	1.010091	1.952151	14.483199
3	5	0.604000	1.286485	4.873693
4	10	0.295471	0.530269	1.733256
5	15	0.065077	0.103614	0.639207
6	20	0.046961	0.049216	0.546048
7	30	0.046526	0.038030	0.082897
8	40	0.036330	0.040391	0.079615
9	50	0.049097	0.042176	0.060593
10	60	0.044082	0.038681	0.068425
11	70	0.037219	0.044072	0.066965
12	80	0.037393	0.044841	0.062425
13	100	0.035756	0.045954	0.059369
14	120	0.035856	0.043554	0.057989
15	141	0.035443	0.038716	0.050549

Al observar la Tabla 2, puede notarse que los valores de los RMS en X y en Y tienden a ser menores que en el eje Z. Es justamente el eje Z el que necesita mayor cantidad de P.A. para lograr tener un RMS que se considere válido. Pix4D (2019) establece que, la precisión válida que se puede alcanzar con fotogrametría con drones es menor o igual a 3*GSD; lo que en este caso sería menor o igual a 8.22 cm.

Este valor es alcanzable, en X, Y y Z, conjuntamente; a partir del modelo N° 8, con 40 P.A.

Al tener organizados los valores de los RMS, se procedió al análisis estadístico, en Statgraphics, partiendo del modelo N° 2 (no se usó desde el modelo 1 porque este no se procesó con P.A.).

III. RESULTADOS

Statgraphics permite obtener una tabla que ajusta los datos a distintos modelos de regresión, brindando la información del coeficiente de determinación (R^2) para cada modelo (tabla 3). El coeficiente de determinación es un parámetro que permite conocer “qué tan bien representa el modelo de regresión a la tendencia de variación de los datos dispersos”.

Se procesaron los datos de RMS del eje Z, por ser este el eje que necesita mayor número de P.A. para lograr más precisión.

TABLA 3
COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN SEGÚN CADA MODELO DE REGRESIÓN

MODELO	CORRELACIÓN	R- CUADRADA
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.997	99.40%
Inversa de X	0.9635	92.83%
Multipliativa	-0.9586	91.88%
Inversa-Y Log-X	0.9356	87.54%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.9337	87.18%
Curva S	0.9295	86.40%
Cuadrado-Y Inversa de X	0.8814	77.68%
Inversa de Y	0.8726	76.14%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8677	75.30%
Logaritmo de X	-0.7573	57.36%
Exponencial	-0.7509	56.38%
Doble Inverso	-0.7378	54.44%
Inversa-Y Cuadrado-X	0.7267	52.80%
Cuadrado-Y Log-X	-0.6332	40.09%
Raíz Cuadrada de X	-0.602	36.24%
Log-Y Cuadrado-X	-0.5663	32.07%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.4822	23.26%
Lineal	-0.4734	22.41%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.4305	18.54%
Cuadrado de Y	-0.3682	13.55%
Cuadrado de X	-0.3246	10.54%
Cuadrado Doble	-0.2464	6.07%
Raíz Cuadrada de Y	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada Doble	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

De la Tabla 3 se entiende que el mejor modelo de regresión es Raíz Cuadrada de Y - Inversa de X. La cercanía de la línea del modelo de regresión, respecto a los datos dispersos, se visualiza gráficamente en la figura 8.

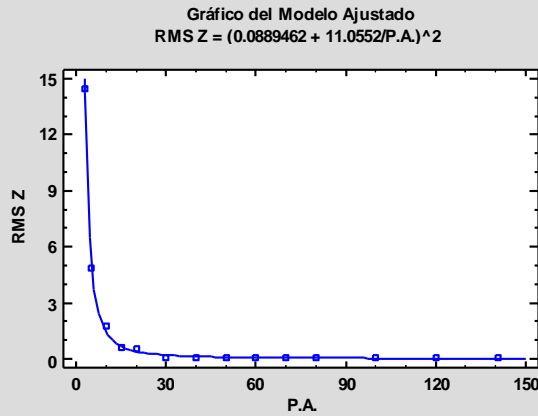


Fig. 8 Gráfico RMS Z vs. P.A., ajustado a la línea Raíz Cuadrada de Y – Inversa de X.

La ecuación de la línea de tendencia, que describe la variación de datos con una fiabilidad 99.40%, es la siguiente:

$$RMS Z = (0.0889462 + (11.0552/(P.A.))^2) \quad (1)$$

La utilidad de esta ecuación radica en el hecho que permite conocer el error medio cuadrático en el eje Z (RMS Z) conociendo el número de puntos de apoyo (distribuidos en el total de la longitud de la vía en usada para este estudio).

Al realizar el cálculo dividiendo “11.0552/(P.A.)” entre el número de kilómetros de la vía levantada, se obtiene la ecuación que relaciona el RMS Z y el número de P.A. usados por cada kilómetro:

$$RMS Z = (0.0889462 + 1.23979/(P.A./km))^2 \quad (2)$$

Con la ecuación (2) se elaboró la tabla 4 mediante tabulación, que relaciona el número de puntos de apoyo colocados por cada kilómetro de carretera, con la precisión a obtener en el eje Z. Adicional a ello, se muestra la equidistancia (aproximada) que pueden tener los puntos de apoyo.

TABLA 4
 TABULACIÓN PARA DIFERENTES NÚMEROS DE P.A./KM, MOSTRANDO EL RMS QUE SE OBTENDRÍA EN Z

P.A./ km	Ec. De ajuste: $(0.0889462 + 1.23978/(P.A./km))^2$		Equidistancia entre P.A. (m)
	RMS Z (m)	RMS Z (cm)	
1	1.7655	176.55	1000.00
2	0.5024	50.24	500.00
3	0.2522	25.22	333.33
4	0.1591	15.91	250.00
5	0.1135	11.35	200.00
6	0.0874	8.74	166.67
7	0.0708	7.08	142.86
8	0.0595	5.95	125.00
9	0.0514	5.14	111.11
10	0.0453	4.53	100.00
11	0.0407	4.07	90.91
12	0.0370	3.70	83.33
13	0.0340	3.40	76.92
14	0.0315	3.15	71.43
15	0.0294	2.94	66.67
16	0.0277	2.77	62.50
17	0.0262	2.62	58.82
18	0.0249	2.49	55.56
19	0.0238	2.38	52.63
20	0.0228	2.28	50.00

De aquí se obtiene el resultado fundamental de esta investigación: A partir de 7 P.A./km, el levantamiento fotogramétrico tiene precisión válida (RMS menor o igual a 3*GSD).

Entregables:

De esta investigación se obtuvieron los entregables siguientes:

A. *Nube de punto densificada.*

La nube de puntos densificada (figura 9) generada cuenta con 78.55 millones de puntos, correctamente georeferidos en X, Y y Z. La densidad media de la nube es de 15 puntos/m².

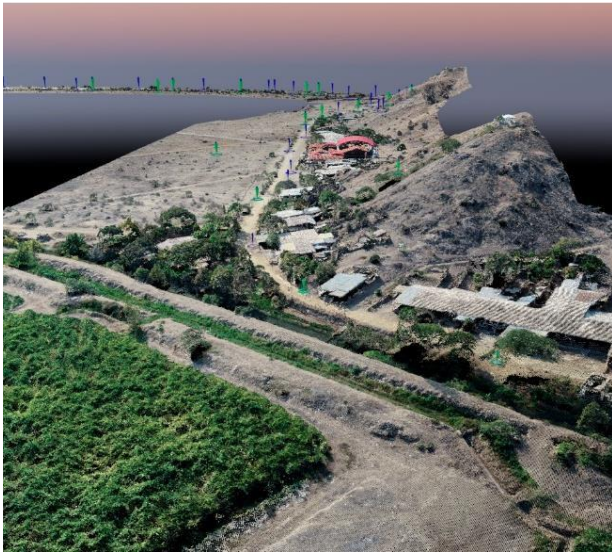


Fig. 9 Nube de puntos densificada.

B. Ortomosaico (ortofoto, ortofotografía).

Es una foto georeferenciada de todo el proyecto; en este caso, de toda la vía levantada. Tiene valores de coordenadas en X y en Y. En la figura 10 se observa el ortomosaico de toda la vía levantada (a color) sobre el lienzo de una foto satelital de Google Earth (escala de grises), mientras que la figura 11 muestra una sección de este ortomosaico, obtenida por acercamiento.



Fig. 10 Ortomosaico (vista completa, barra de escala: 0 km a 3 km).



Fig. 11 Ortomosaico (vista ampliada).

C. Modelo digital de superficie (MDS).

Es un modelo tridimensional generado con la nube de puntos densificada, tomando en cuenta todos los puntos, incluyendo los de vegetación y edificaciones. Se genera mediante el procesamiento de la nube de puntos densificada, en Global Mapper (se puede hacer en Pix4D; sin embargo, Global Mapper ofrece mayor versatilidad). La figura 12 muestra el mapa con una sección del MDS.

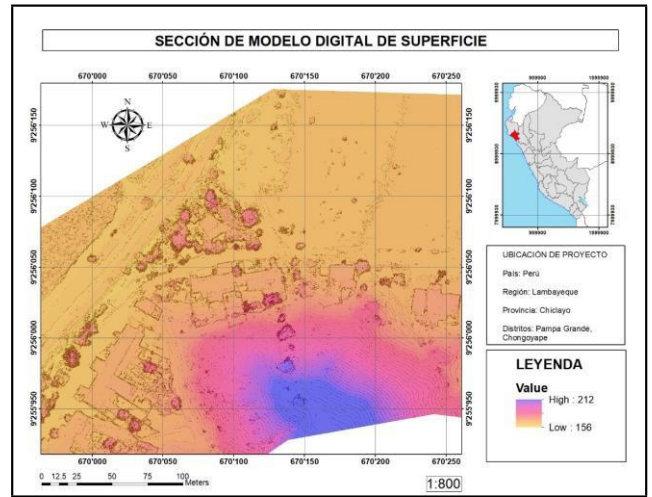


Fig. 12 Modelo digital de superficie. Plano generado en ArcGis.

D. Modelo digital de terreno (MDT).

Es un modelo tridimensional generado con la nube de puntos densificada, tomando en cuenta solo los puntos que representan el suelo. Se genera mediante el procesamiento de la nube de puntos densificada, en Recap, donde se eliminan los puntos que no corresponden al suelo, como los que representan edificaciones, vegetación y otros objetos. El MDT es el la “superficie” construida en Civ il 3D con los datos que se exportan de Recap. La figura 13 muestra el mapa con una sección del MDT.

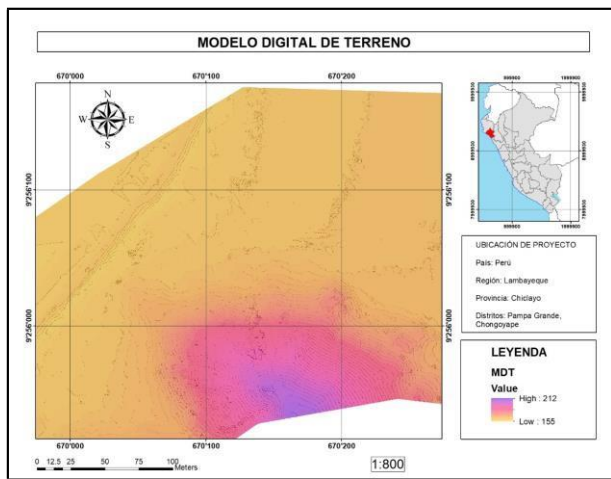


Fig. 13 Modelo digital de terreno. Plano generado en ArcGis.

E. Plano de curvas de nivel.

Los planos de curvas de nivel se generan en Civil 3D, partiendo del MDT. Civil 3D permite ingresar fotografías, por lo que se ingresó el ortomosaico en formato .ecw, lo que comprime su peso pero no disminuye su resolución. La visualización del ortomosaico debajo de las curvas de nivel del MDT permite una mejor orientación al leer el plano, apreciable en la figura 14.

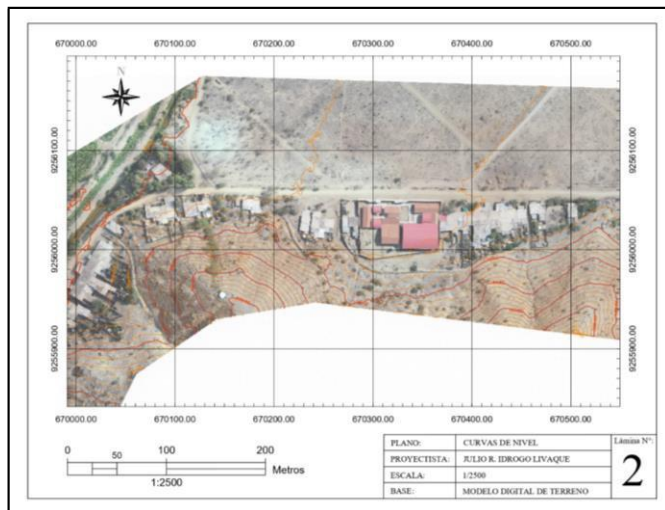


Fig. 14 Plano de curvas de nivel.

IV. CONCLUSIONES

Se evaluó la precisión del modelo digital de terreno (MDT) considerando el número de puntos de apoyo terrestre en un levantamiento fotogramétrico aplicado en la carretera Pampa Grande – Tablazos, provincia de Chiclayo; obteniéndose que a partir de 7 P.A./km, la precisión es considerada como válida, para las características de planificación y procesamiento empleadas.

Limitaciones de los resultados:

Respecto a la ecuación de la línea de tendencia, la cual predice la precisión en el eje Z, de acuerdo al número de P.A./km; no se ha encontrado una asíntota horizontal (número de P.A./km a partir del cual la precisión no varía, aunque se aumente el número de P.A. con tendencia al infinito), debido a que este sería un valor numérico que probablemente diste de la realidad. Se requieren futuros estudios específicos para responder a esta incógnita.

La precisión en los resultados de los levantamientos fotogramétricos está condicionada por factores diversos, de los que preponderan: la altura de vuelo, el traslape de fotografías, la resolución de la cámara de la aeronave, precisión de los P.A. (GNSS) y la capacidad de procesamiento de las computadoras disponibles. Al variar estos valores, por ejemplo, al disminuir la altura de vuelo para obtener un GSD más bajo (mejor resolución), aumenta considerablemente el tiempo de vuelo de la aeronave y el número de fotografías tomadas; asimismo, aumenta el tiempo de procesamiento y el peso de los archivos generados. Es importante considerar estas limitaciones y, en un futuro, estudiar el comportamiento de alguna(s) variable(s) respecto a la manipulación de las demás.

Se puede - y se debe - mejorar la precisión de los P.A. y P.C. al mejorar las dianas fotogramétricas, de forma que en ellas se visualice mejor la marca del punto. Al mejorar la visualización del punto de apoyo o punto de control terrestre levantado, se tendrá también mejor precisión en los resultados finales. Al planificar un trabajo de levantamiento fotogramétrico, se estima el número de P.A. y P.C. a usar y se recomienda que las dianas fotogramétricas sean del tamaño adecuado para ser vistas por la cámara del dron con buena resolución. De preferencia, impresas en materiales plásticos o textiles con mediana rigidez y en colores visibles, que se distingan del terreno o área circundante.

AGRADECIMIENTO

La presente investigación se realizó gracias a la valiosa colaboración del geógrafo Omar Antonio Ramírez Peón, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

REFERENCIAS

- [1] Hilario Tacca, Q. (2015). Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional. *Universidad Nacional del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3882>
- [2] Solis Solares, O. D. J. (2016). *Comparación de costos entre métodos convencional de medición topográfica con estación total y fotogrametría, para elaborar estudios de prefactibilidad en el diseño geométrico de carreteras* [Other, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5210/1/Oswin%20David%20Jos%20C3%A9%20Solis%20Solares.pdf>
- [3] Ayala, A., & Carlos, J. (2018). *Fotogrametría aérea con unidad autónoma de vuelo (UAV) como herramienta de monitoreo ambiental de*

- depositos de relaves. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/1570075>
- [4] Gonzáles López, E. J., & Castañeda Nieves, R. R. (2019). Uso de la aerofotogrametría para el estudio de pre factibilidad de la carretera ayash distrito de san marcos, provincia de huari, departamento Ancash. *Universidad Privada Antenor Orrego*. <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/4799>
- [5] Aguinsaca, P. A. P., & Torres, B. A. Z. (2020). Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 17(2), Article 2. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6599>
- [6] Arévalo Valdés, J. A. (2008). *Diseño de la línea pelo a tierra o preliminar de caminos y carreteras a partir de la información de fotografías aéreas aplicando fotogrametría* [Masters, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://portal.ingenieria.usac.edu.gt/>
- [7] Castillo, F. D., García, D., Escarcena, C., Oliveras, F., Fernández, I., Jenou, E. H., & Montero, C. (2006). *Generación de una base de datos de movimientos de ladera mediante técnicas de fotogrametría digital en la Sierra de la Contraviesa (Granada)*. 16.
- [8] Castro, Y. (2020). Revista Cubana de Información en ciencias de la Salud. El Plagio académico desde la perspectiva de la Ética de la Publicación Científica. Lima
- [9] Coello Romero, A., & Ballesteros Abellán, G. (2015). *Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con topografía clásica*. [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM). <http://oa.upm.es/34699/>
- [10] Fernández Movilla, S. (2019, septiembre). *Influencia de los puntos de control sobre el terreno en la precisión de los modelos digitales de superficies generadas mediante fotogrametría*. (east=-3.530299; north=41.0593529; name=Montejo de la Sierra, Comunidad de Madrid, España) [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (UPM). <http://oa.upm.es/56668/>
- [11] Fernández-Lozano, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2016). Aplicaciones Geológicas de los Drones—Geological Applications of UAVs. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29, 89-105.
- [12] Jaramillo, Y. J. L., & Torres, B. A. Z. (2020). Evaluación del modelo digital de terreno obtenido mediante técnicas de fotogrametría con VANT y con técnicas GNSS aplicados a proyectos viales en zonas de mediana vegetación. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 17(2), Article 2. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6636>
- [13] Lavado, P., & Raúl, R. (2019). Modelo analítico de los parámetros para la fotogrametría con drones en obras viales. *Universidad Peruana Los Andes*. <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/UPLA/1121>
- [14] Liba, N., & Berg-Jürgens, J. (2015). Accuracy of Orthomosaic Generated by Different Methods in Example of UAV Platform MUST Q. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96, 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012041>
- [15] Marín, R. M., Golpe, J. F., & Espeso, J. M. S. (2002). Definición geométrica del trazado en planta de una carretera a partir de su levantamiento fotogramétrico. *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 19(110), 45-54.
- [16] Marina de Guerra del Perú. (2020). *Normas Técnicas Hidrográficas N°49*.
- [17] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, M. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- [18] Molina, J. P., Pérez, J. A. Q., Tapia, A. R. R., Higuera, A. P., Beltrán, M. Á. R., & Jiménez, M. Z. (2012). Elaboración de cartas aeronáuticas OACI: Planos de obstáculos de aeródromo, a partir de imágenes aéreas digitales de pequeño formato. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 79, 75-96.
- [19] Pari Rendon, R. W., & Sedano Mateo, F. D. (2020). Análisis, desarrollo y comparación de un levantamiento fotogramétrico realizado con un RPA frente a un levantamiento topográfico convencional realizado con GNSS
- Mina Barick, 2018. *Universidad Privada del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23460>
- [20] Phantom 4 Pro—DJI. (s. f.). *Phantom 4 Pro*. Recuperado 2 de febrero de 2021, de <https://www.dji.com/phantom-4-pro>
- [21] Pix4D. (2019). *¿Qué es la precisión en un proyecto de mapeo aéreo? Pix4D*. <https://www.pix4d.com/es/blog/mapeo-aereo-de-precision>
- [22] Sedano Mateo, F. D., & Pari Rendon, R. W. (2019). Ventajas en los levantamientos topográficos con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Universidad Privada del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21067>
- [23] SUNARP, S. N. de los R. P., & SNCP, S. N. I. de I. C. P.-P. (s. f.-a). *Manual de Levantamiento Catastral Rural*.
- [24] SUNARP, S. N. de los R. P., & SNCP, S. N. I. de I. C. P.-P. (s. f.-b). *Manual de Levantamiento Catastral Urbano*.
- [25] Torrado, J. O. E., Jiménez, J. J. C., & Díaz, H. P. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6371513>