ANÁLISIS DE VARIACIÓN MÉTRICA ENTRE MEDICIONES TOPOGRÁFICAS Y LAS OBTENIDAS CON PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ADQUIRIDAS POR DRONES

ANALYSIS OF METRIC VARIATION BETWEEN TOPOGRAPHICAL MEASUREMENTS AND THOSE OBTAINED BY PROCESSING IMAGES ACQUIRED BY DRONES

William Barragán Zaque[1]
Brandon Sebastián López Ayala[2]
Nelson Enrique Barrios Jara[3]

Resumen

La topografía es la base para el inicio, desarrollo y culminación de cualquier obra de ingeniería. Partiendo de un modelamiento de terreno, se brinda la capacidad de configurar una idea sobre el mismo. Se hace posible, mediante el uso de métodos de levantamientos, como lo son: la captura de datos con topografía convencional, estación y prisma, y la toma de imágenes aéreas con UAV[4] y posterior proceso digital. La continua evolución de los instrumentos utilizados para la realización de estos levantamientos y la búsqueda por mejorar la precisión, calidad y densidad de información entre otros factores, lleva a comparar estos dos procedimientos, teniendo en cuenta, desde su inicios, procesamientos y salidas resultantes. De esta manera, conocer las variaciones existentes entre sus coordenadas y modelos digitales de elevación, tanto visual como estadísticamente, determinando su efecto para resultados prácticos. La fase experimental se llevó a cabo en una cancha de fútbol construida en grama natural, ubicada en la ciudad de Bogotá, específicamente en el barrio Marsella. Con los componentes estadísticos y comparaciones visuales, se evidenció una variación notable en el atributo de altura, para cada uno de los puntos obtenidos entre el método convencional y el uso de fotografías aéreas con UAV. Concluyendo así, que las dos técnicas son complementarias, con ventajas y desventajas. Por un lado, el levantamiento topográfico tradicional tiene bases y resultados de alta precisión en sus componentes. Por el contrario, en el producto de las imágenes aéreas, la cota es considerablemente afectada, conservando sus propiedades en coordenadas x, y.

Palabras Clave: Topografía, Drones, variación, DEM, modelo.

Summary

Topography is the basis for the start, development and completion of any engineering work. Starting from a terrain modeling, the ability to configure an idea about it is provided. It is possible, through the use of survey methods, such as: the capture of data with conventional topography, station and prism, and the taking of aerial images with UAV and subsequent digital

Recepción: Septiembre de 2021 / Evaluación: Octubre de 2021 / Aprobado: Diciembre de 2021

[1] PhD. MSc. Fotogrametría y Geoinformática. Esp. Sistemas de Información Geográfica, Profesor Titular, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. Email: wbarraganz@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9851-7857b

[2] Ingeniero Topográfico, Investigador de grupo de investigación Geotopo, Facultad de medio ambiente y recursos naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Email: bslopeza@correo.udistrital.edu.co, https://orcid.org/0000-0001-0917-923L

[3] PhD. Gerencia y politicas educativas. MSc Educación. Licenciado en Física, Profesor Titular, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. Email: nebarriosj@udistrital.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0815-201X

[4] Por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo no Tripulado)

processing. The continuous evolution of the instruments used to carry out these surveys and the search to improve the precision, quality and density of information, among other factors, leads us to compare these two procedures, taking into account, from the beginning, processing and resulting outputs. In this way, knowing the existing variations between its coordinates and digital elevation models, both visually and statistically, determining its effect for practical results. The experimental phase was carried out on a soccer field built on natural grass, located in the city of Bogotá, specifically in the Marsella neighborhood. With the statistical components and visual comparisons, a notable variation in the height attribute was evidenced, for each one of the points obtained between the conventional method and the use of aerial photographs with UAVs. Thus concluding that the two techniques are complementary, with advantages and disadvantages. On the one hand, the traditional topographic survey has high precision bases and results in its components. On the contrary, in the product of the aerial images, the height is considerably affected, preserving its properties in x, y coordinates.

Keywords: Topography, Drones, variation, DEM, model.

Introducción

En el campo de la ingeniería, en donde se proyecta la realización de algún tipo de construcción, ya sea una edificación, obras viales, presas, canales, entre otros, es necesario plasmar el comportamiento del terreno; labor por la cual se constituye un profesional con los conocimientos y habilidades necesarias para tal fin, un ingeniero topográfico.

La topografía permite la colocación de coordenadas en las coordenadas x,y y z. Proporciona descripciones detalladas de sus partes planas. Dado el grado de precisión e incertidumbre involucrados, los diversos métodos disponibles para medir el terreno brindan aproximaciones del mundo real que no reflejan la verdadera forma de la tierra. Estos modelos se desarrollan y aplican a áreas terrestres relativamente pequeñas donde la curvatura natural de la tierra no afecta significativamente las mediciones.

Ahora bien, con el constante avance de la tecnología; los profesionales y la ingeniería topográfica están en permanente actualización, en cuanto a los nuevos instrumentos y métodos de captura de datos. En gran medida se utiliza la estación total, definido como un dispositivo electro-óptico, que se compone de un distanciómetro y un microprocesador incorporado a un teodolito electrónico, que le permite una precisión de medida milimétrica. (Tacca Qquelca, 2015).

Con la implementación de una tecnología más sofisticada y considerablemente más compacta en sus mecanismos, el dron de categoría RPAS[5] "Término para denominar al sistema completo (aeronave, enlace de comunicaciones y estación de tierra) de las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto" (Montero, 2016); dotado de una cámara fotográfica, GPS[6], además de otros sensores, hace posible la captura de datos en un menor tiempo y costo.

Por otro lado, la fotogrametría se ocupa de la obtención de medidas precisas a partir de pares fotográficos, elaborando mapas y planos (Fernández García, 2015), esta cumple un papel fundamental en el campo de trabajo, sin embargo, limita su aplicación a proyecto específicos o de gran extensión, debido a su elevado costo de acceso y post proceso.

Como producto de estos, los modelos digitales de elevación (DEM[7]) son una de las formas más efectivas de representación de la superficie terrestre, estas se han convertido en

[5] Remotely Piloted Aircraft System (Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente)
[6] Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
[7] Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación)

herramientas principales de diferentes ramas, como análisis espaciales, urbanizaciones, gestión del riesgo, movimientos de tierra, entre otros (Garzón, 2013).

En consonancia los modelos digitales de elevación son productos de una matriz de celdas representando diferentes niveles digitales (ND), donde dan como producto una capa simbólica de dicha matriz y sus ND, con amplias aplicaciones en diferentes disciplinas; creados en base de algoritmos de interpolación resultantes de interactuar entre su nube de puntos. Teniendo una mayor cantidad de datos, se obtendrá un DEM más detallado y apegado a la verdadera superficie. Tanto visual como numéricamente brinda una fácil interpretación del terreno, así como una densa cantidad de datos, usado comúnmente para análisis de extensiones de gran área, proyectos de gran envergadura o movimientos masivos de volúmenes de tierra (Garzón, 2013).

Por lo tanto, con la automatización de los procesos de interpolación, se tiende por elegir aquel algoritmo que, mediante un análisis más visual y no de sus variables resultantes, refleje una representación armónica del comportamiento de los datos, dando por sí un análisis objetivo erróneo de sus características espaciales (Barragan, 2020).

En este orden de ideas, para el presente trabajo, se clasificaron dos tipos de los métodos principales para la realización de proyectos topográficos, como lo son: el convencional directo con estación total y el indirecto con captura de datos mediante dron. Los cuales se aplicaron y analizaron sus resultados y posibles aplicaciones finales.

Por lo anterior, se evalúan ambos métodos, desde sus aspectos de toma de datos en campo, así como sus productos finales en diferentes criterios, con la utilización de modelos estadísticos que reflejen su variabilidad y semejanzas. Teniendo en cuenta los errores tanto sistemáticos y errores aleatorios (barragán, 2016).

La zona delimitada y el área de trabajo de la organización, en construcción y mantenimiento de campos deportivos, limita la aplicación de este trabajo en un proyecto de 9000 metros cuadrados, en donde su levantamiento y servicios topográficos prestados adicionales se usarán para la implementación del mismo. La comparación estadística de ambos métodos se realizó a partir de sus componentes (x, y, z), calculando sus medidas de centralización, posición y dispersión, y sus productos de modelos digitales de elevación mediante cinco de los principales algoritmos de interpolación aplicado a la nube de puntos.

Metodología

Para este proyecto se establecen 2 metódicas. Una por cada método de levantamiento topográfico, siguiendo los lineamientos convencionales de verificación tanto en campo como en el post-proceso correspondiente. Posteriormente, el proceso común de generación de los modelos raster, con cinco métodos de interpolación elegidos.

Levantamiento Topográfico

Una vez delimitada la zona del levantamiento y escogidos los puntos de radiación se inicia con el proceso planteado, para esto se utilizó la estación topográfica total Sanding Arc 5, este instrumento cuenta con unas especificaciones en la medición de distancia de máximo 5000 metros de lectura con prisma (con un laser clase IIIA), utilizando el principio de la luz recorriendo una distancia de punto A – B ecuación (1), con una precisión de ±(2mm+2ppm* D) r.m.s.e.*3; con una lectura mínima en ángulo de 1” con una precisión de 2” y un aumento 3x y 5º de visión en su lente. (COLOMTOPO S.A.S., 2020)

$$D = \frac{1}{2}ct = \frac{1}{2}\frac{c\varphi}{\omega} = \frac{c}{4\pi f}\left(N_\pi + \Delta_\varphi\right) = \frac{\lambda}{4}(N + \Delta N) \quad (1)$$

Donde: D representa la distancia recorrida por la luz en la atmósfera entre dos puntos A y B λ = es la longitud de onda (c/f); Δ_φ = es el retardo de fase de la luz que no cumple π; N = el número entero de semiciclos de onda para el viaje ida y vuelta; ΔN = la fracción restante producida por la onda.

Con un total de 317 puntos levantados en sus atributos x, y, z en campo, como post proceso se generan el doble de puntos con una interpolación en una grilla 5 por 5 metros en AutoCAD Civil 3D, para comparar con una generación artificial de los datos originales. Este proceso se llevó a cabo en dicho software, subiendo la nube de puntos como un PENZD (Punto, Este, Norte, Cota, Descripción) en un archivo tipo texto delimitado por comas. Determinando sus curvas de nivel entre 0,100 mts y 0,200 mts por la naturaleza semi-plana del terreno. Dando 330 puntos artificiales, para un total de 647 datos, posteriormente trabajados para los DEM.

Levantamiento con UAV

La captura de imágenes aéreas se llevó a cabo con un dron de la categoría UAV, definido en términos de uso militar como Unmanned Aerial Vehicle, en español vehículo aéreo sin tripulación, perteneciente a la sub-categoria conocida como RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), conjunto que abarca el dron, el control en tierra y el piloto quien lo controla remotamente. (Universidad Internacional de Valencia, 2018).

De la casa DJI el dron Mavic Pro de su línea comercial, es herramienta compacta y dotada con una cámara con un tamaño máximo de imagen de 4000 x 3000 pixeles (pixel definido como el valor mínimo de una imagen), un sensor FC220 DJI de 12,35 Megapíxeles en pixeles efectivos, este último como la parte más importante, en base al principio básico de captura de imágenes, conducir la luz externa al sensor. (Vazquez & Backhoff, 2017). Los estándares de fabrica para la distancia focal es de 4,74 mm, corroborando en los detalles de los archivos de las capturas realizadas con 5 mm.

Una vez definida la zona de trabajo y previa verificación de la restricción de altura de vuelo u otras, comprobando todos los elementos del dron, se inició la aplicación Pix4D Capture desde un dispositivo móvil con GPS y emparejamiento a la aeronave, donde se eligen el tipo de dron, altura de vuelo, dimensiones de línea de vuelo, comprobación de traslapo mínimo de un 80%, entre otros parámetros en tiempo real del dispositivo, como batería, ubicación, avance durante el vuelo, punto de regreso de emergencia, distancia recorrida, número de fotografías y telemetría.

Calibración y procesamiento de imágenes

Finalizada la etapa de captura de imágenes de terreno planeado, se procede a la toma de fotografías para la calibración de los parámetros físicos de la cámara. Esta realizada mediante un patrón, cuadricula tipo ajedrez de blancos y negros, en pantalla LCD. Se utilizan modelos paramétricos y coeficientes de distorsión no lineales para su proceso. (GEOBIT, 2020)

El proceso de calibración enseña la distorsión radial para cada imagen con un patrón en puntos azules y rojos, y su desviación aparente respecto al calculado. También genera los parámetros de la cámara para un cálculo de distancia focal de 4,73 milímetros usados posteriormente para las imágenes del terreno.

Dando como resultado dos gráficas del comportamiento de la distorsión radial y tangencial (Figura 1), esta primera se expresa en términos de x, y, asociada a la distancia focal

y determinada como el modelo de distorsión gaussiano, teniendo la interpretación de una distancia radial calculada con un punto en la imagen y su correspondiente calculado, su comportamiento de error es proporcional en base a los puntos se alejan del centro de la foto, siendo su centro una distorsión nula y sus bordes la máxima, causa de las imperfecciones en la curvatura del lente, y relacionada esta ultima en la distorsión de la curvatura en función de su radio. (Aguirre de Mata, 2016)

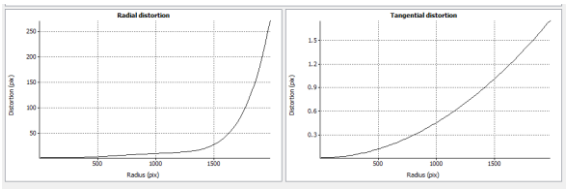


Figura 1: Distorsión radial y tangencial. Fuente: Autores

Con un total de 60 fotografias aéreas tomadas en el plan de vuelo y mediante el software Pix4D Mapper, se inicio el post-proceso de las imágenes, importanto primero los archivos resultantes y detectando WGS 1984 como Datum y su sistema de coordenadas UTM Z-18N.

Definidos el sistema de coordenadas detectado y el de salida, se ajustaron los parámetros calibrados de la cámara, la distancia o longitud focal de 4,73 mm las coordenadas en x y del punto principal, y los valores de distorsión radial R1, R2, R3 y tangencial T1 y T2, calculando así automáticamente el resto de criterios.

Se utiliza la plantilla predefinida para la generación de modelos digitales “Mapas 3D” ajustada con 3 procedimientos en la interfaz:

1. Iniciando el primer paso se muestra el cálculo de los keypoint en la interfaz “rayCloud”, donde se habilita la herramienta de puntos de control, para este caso los puntos se ingresaron de forma manual, pero el apartado contempla datos desde un archivo, se determinaron 4 etiquetas de tipo “Punto de Control” y atributos X, Y, Z para cada uno. Finalizado, se muestran marcados en color azul y por cada uno se observan cuantas fotografías tienen en común al punto.
2. En el segundo paso se generó la nube de puntos densa (Figura 2), con el total de la información de las imágenes, el proceso más duradero, sin embargo, esta herramienta permite la simplificación de la información fraccionando los puntos de salida. Como tercer y último paso se realiza la calibración radiométrica con una de las fotografías, esta puede ser realizada tomando de referencia cualquier objeto visible y que usará el software como parámetro para reducir dicha distorsión en las demás imágenes. Para el proyecto se implementa la demarcación central de una cancha sintética existente aledaña a la zona del levantamiento.

Figura 2: Nube de puntos densa. Fuente: Autores

3. Como último paso se generó el Modelo Digital de Elevación, un PDF 3D y la ortofotografía (Figura 3). Adicional se completa el reporte de calibración.

Figura 3: Ortomosaico. Fuente: Autores

En el reporte se resume la información del postproceso, primero teniendo 60 de 60 imágenes calibradas, un total de 22871 puntos keypoints por imagen. una diferencia de los parámetros iniciales de la calibración de cámara del 4,1% respecto a la primera (dentro del rango de más de un 95% de confianza), con una distancia focal de 4,73 mm y 4,924 mm optimizado para los cálculos, al igual que en sus variables radiales y tangenciales. Dando un RMSE[8], X=0,160548, Y=0,426183, Z=0,451590. Generando 6.420.936 puntos, con una triangulación de máximo 1.000.000 de triángulos.

Interpolación RASTER

Previo a la interpolación de los modelos digitales, se cargaron los insumos iniciales para cada método, clasificados en dos: 1.Nube de puntos original más generados por grilla con 647 puntos, 2.Nube de puntos densa recortada obtenida con dron con 31.450 puntos. Al cargar estos grupos al software ArcMap se debe garantizar que pertenezcan y estén ubicados en la zona correcta, esto con ayuda del "world imagery" proporcionado por defecto.

Para la visualización de una nube de puntos densa en formato "las" en la interfaz de ArcMap, es necesario por su naturaleza, crear una extensión que convierta los datos a visualizar, esto en el modulo de ArcGIS de ArcCatalog, creando en el catálogo interno una nueva extensión "LAS Dataset", donde posteriormente se carga el archivo generado por el procesamiento de las imágenes aéreas, asignando el sistema de coordenadas de lectura.

Con el Dataset creado y cargado el archivo, se muestra en la interfaz, con esta visualización se cargan 6.398.545 de puntos, de los cuales sobresalen de la zona delimitada del levantamiento, para esto se recorta la nube de puntos con el software Global Mapper, dada su facilidad de carga del archivo y recorte del mismo. Con este recorte el número de puntos de la zona se reduce a 3.370.008.

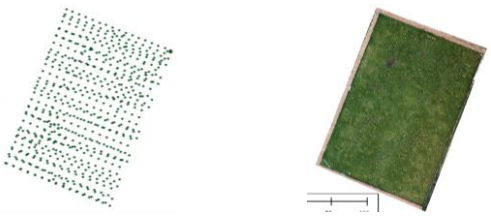


Figura 4: Nube de puntos levantamiento convencional y recorte puntos Dron. Fuente: Autores

Para el correcto tratamiento de los datos, se pasa de un atributo visual a una clase (feature) que el software pueda operar, mediante el TIN por defecto, pasando a un Raster y de este a un Multi-point, sub dividiendo sus celdas en puntos independientes para la interpolación. Como resultado se dan 31.450 puntos.

[8] Raíz del error medio cuadrático (Root Mean Square Error)

Métodos de interpolación

Se definen cinco clases de interpolación, son clasificadas estadísticamente en el método por cuantiles, con 10 categorias, y bajo el mismo rango visual de colores, pero invertido en las dos metodologías, para su mejor interpretación y análisis. Teniendo las siguientes:

1. TIN: Partiendo de la triangulación como el método para subdividir un área determinada empleando triángulos, este método debe cumplir con la condición de Delaunay ecuación (2), la cual, establece que ningún punto debe estar contenido en una circunferencia circunscrita en cada triángulo, es decir, garantiza que ningún vértice unido por sus aristas se cruce con otro, formando así el mallado de triángulos. (Barón Fernández & Romero, 2016)

$$S = x + \frac{1}{2}(x^2 + r^2)e_\infty + e_0 \qquad (2)$$

Donde se analiza la condicion para un punto y una esfera proyectada en los tres vertices de la triangulación.

2. IDW: La distancia inversa ponderada, estima los valores desconocidos, interpolando, al especificar la distancia entre los puntos más cercanos, ecuación (3) relacionando sus elevaciones en donde se restrinja por sus valores mínimo y máximo. Con el uso de dos o más puntos conocidos determinar un valor intermedio desconocido. En este puede usarse la auto-correlación espacial utilizando los datos más cercanos para crear uno nuevo, también puede hacerse el uso de un radio de búsqueda, donde los datos dentro de este serán usados para la aplicación, detectando barreras como picos o ruido entre la información. (ArcGeek, 2018)

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{z_i}{d_i^p}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{d_i^p}\right)} \qquad (3)$$

3. KRIGING: Este método de interpolación determinista utiliza la ponderación de distancia inversa este se basa según el semivariograma determinado a través de las variaciones de cada par de datos en términos de la distancia. Esta información requiere ser de una distribución normal en su histograma, deben ser estacionarios y no pueden ser tendencias. (ArcGeek, 2018)

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^{n} w_i f_i \qquad (4)$$

La herramienta Kriging, ecuación (4), ajusta la función F matemática a un número de puntos dentro de un radio predefinido, donde predice la ubicación específica para los datos creados por la interpolación, dando así, una predicción del comportamiento de la superficie con un nivel de certeza. (ESRI, 2020)

4. NN: El método de vecino cercano (Natural Neighbor) también conocida como la interpolación de Sibson o Robo de área en la ecuación (5), utiliza un subconjunto de muestra de la población de puntos (w), que rodean los puntos de consulta (x, y), aplicando ponderaciones sobre las áreas colindantes al dato buscado y asegura la altura interpolada. Esté es un proceso que no produce picos o valles (no definidos previamente en las muestras de entrada) y suaviza la superficie en toda su extensión. (ESRI, 2020)

$$G(x,y) = \sum_{i=1}^{n} w_i f(x_i, y_i) \qquad (5)$$

5. SPLINE: Usa la matemática lineal para minimizar la curvatura general de la superficie ajustándose al comportamiento de alturas de los puntos de muestra. El terreno debe tener una curvatura mínima, pero hasta ciertos rangos funcionando mejor para pendientes donde su variación sea leve, para esto se adicionan dos variables: el peso y el número de puntos; esta primera se evalúa en las tres primeras derivadas del conjunto de datos y se denominan Tau, donde a un mayor valor de estos, se garantiza una superficie más suave. (ESRI, 2020)

$$P(x) = ax^2 + bx + c \qquad (6)$$

Aplicando su uso derivado de la ecuación (6) como una interpolación segmentaria cuadrática lineal, remplazando en este su punto inicial y extrapolando en su curva normal.

Resultados

Para representar gráficamente el comportamiento de los datos del conjunto hechos por el levantamiento topográfico convencional y los puntos obtenidos del procesamiento de imágenes obtenidas con dron, se optó por un histograma de frecuencia, tomando como variable el atributo cota (z), siendo este el valor más crítico de evaluación, el cual se gráfica a partir de unas clases siguiendo un rango de valores o amplitud, entre el número del intervalos definidos, 10 para este caso, definido como una sucesión de barras o rectángulos, donde su área abarca proporcionalmente a la frecuencia de cada grupo. Esto determina los conjuntos de valores de naturaleza continua y cuantitativa. (Salazar P. & del Castillo G., 2018)

Lo anterior generado igualmente para el proceso resultante de la toma de imágenes aéreas con UAV, posterior al postproceso en Pix4D obteniendo la nube de puntos densa, y recortando la información y simplificando sus atributos en coordenadas (x, y, z), pasando a una reducción del 99,07%, con un 0,93% de los datos respecto al recorte, esto resultante de la triangulación inicial.

Como resultado adicional, se resumen los raster producto de cada interpolación, con una asignación de 10 intervalos de color entre los datos, siendo para los puntos básicos más grilla el color rojo que representa las zonas más altas del terreno y verde su parte más baja, para los puntos del dron el rango de colores se encuentra invertido.

Una vez generadas las nubes de puntos para ambos métodos de levantamiento, se escogen 4 puntos, las esquinas del lindero perimetral sobre el terreno natural, para el cual el software ArcMap arroja las coordenadas por cada uno. Dando así una forma de evaluar si poseen o no variación, tomando como dato independiente la topografía convencional e independiente el resultante de la captura de imágenes aéreas, definiendo así tres diferencias (Δx,Δy,Δz).

Resumiendo, en las tres diferencias (Δx,Δy,Δz), para cada uno de los cuatro puntos, dando variaciones tanto positivas como negativas relativas a la posición de la superficie, con una mayor magnitud en el atributo Z o cota de elevación del terreno respecto a la topografía convencional.

Tabla 1: Diferencias puntos de control

DIFERENCIAS			
PUNTO	COORDENADAS - UTM - Z18N (WGS-84)		
	E	N	Z
1	-0,013	0,034	-0,947
2	0,003	0,045	0,949
3	0,054	0,098	0,938
4	-0,057	0,048	-0,881

Fuente: Elaborado por el autor

Discusión

Definiendo la desviación estándar muestral como ecuación (7):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N}(x_i - \bar{X})^2}{N-1}} \qquad (7)$$

Donde evalua la sumatoria de la diferencia de un valor x_i y su media $\bar{X}$ hasta el valor máximo N en relación a su muestra N-1.

Comenzado por el levantamiento topográfico convencional con 317 puntos y la adición a 647 datos total con la herramienta "Create Point-Grid", se observa una mejora en la desviación estándar muestral de 1.019 en Norte, 1.275 en Este y 0.005 en Cota. La raíz del error medio cuadrático tiene una reducción de 0.991 en Norte, 1.252 en Este y 0.005 en Cota. Así como la varianza muestral con una deducción de 66.056 en Norte, 65.043 en Este y 0.001 en Cota. Igualmente, en el error medio absoluto de 1.092 en Norte, 1.230 en Este y 0.005 en Cota. Finalmente, el coeficiente de variación las apreciaciones más reducidas con 0.001 en Norte, 0.000 en Este y 0.000 en Cota.

Por otro lado, evaluando los puntos básicos más la grilla de 5 x 5 mts y los generados con el procesado de imágenes aéreas con UAV, recortados y productos de la herramienta Multi-point, las variables en general están por encima del primer método, teniendo en la desviación estándar un aumento 0.469 en Norte, 0.698 en Cota y una disminución de 0.816 en Este. Caso parecido en la raíz del error medio cuadrático con un incremento de 0.494 en Norte, 0.698 en Cota y una reducción de 0.797 en Este. Teniendo el mismo comportamiento para la varianza muestral con 32.666 en Norte, 0.696 en Cota y 39,757 menos en Este. Igualmente, en el error medio absoluto con 0.211 más en Norte, 0.577 en Cota y 0.718 por debajo en Este. Por último, el coeficiente de variación con 0.001 superior en Norte, 0.000 en Este y 0.027 por encima en Cota.

Tabla 2: Desviaciones estándar. Elaborado por el autor

DESVIACIÓN ESTÁNDAR

MODELOS DIGITALES	PUNTOS BÁSI	PUNTOS BÁSICOS +	PUNTOS DRON MULTI

	COS (1)	GRIL LA (2)	POINT (3)
TIN	0,143	0,143	0,853
IDW	0,173	0,178	1,135
KRIGI NG	0,196	0,192	1,373
NN	0,143	0,143	0,846
SPLIN E	0,466	0,358	13,521

Fuente: Elaborado por el autor

La interpolación realizada mediante el levantamiento con topografía convencional, puntos básicos + grilla, generado a partir 647 datos tiene la relación más baja de desviación estándar, referente a los 317 originales, la mayor dispersión general en medidas es para el método obtenido a partir de imágenes aéreas.

Por modelo de interpolación las desviaciones estándar más bajas corresponden al TIN con 0.143 de (1) y (2), IDW con 0.173 para (1), KRIGING con 0.192 de (2), NN para (1) y (2) con 0.143 y SPLINE con 0.358 de (2) (Tabla 2).

La interpolación realizada con los cinco métodos diferentes disponibles por el software ArcMap, conservan los rangos de altura distribuidos alrededor de las 10 clases, invirtiendo el rango de color para los dos levantamientos, siendo el de topografía convencional el rojo la zona más alta y el verde con la cota más baja, viceversa para los puntos obtenidos con imágenes aéreas. Mostrando para los dos primeros casos, con un adicional de puntos se realza la información obtenida y el detalle del raster, visualizando puntos de altura relevantes y zonas en las que su pendiente puede influir en un posible cálculo de volúmenes o decisiones in situ.

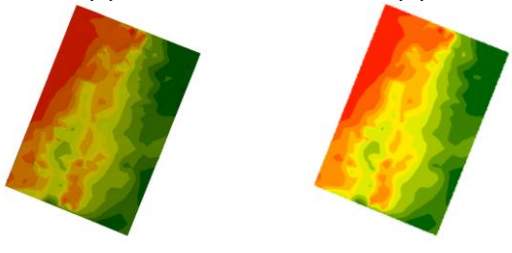
Para los productos consecuentes de la nube de puntos se evidencia un patrón uniforme en tanto a sus cambios de altura para todas las interpolaciones, diferente al realizado con topografía convencional y que, en caso de ser erróneo, arrojaría información falsa a cualquier operación realizada sobre este, en términos de altura (Figura 5).

Los diagramas de frecuencia, de cada raster producto del cálculo de la interpolación, toman las celdas (pixeles) para graficar dicho histograma, de los cuales los métodos TIN, IDW y NN generan una distribución normal, que no es uniforme, pero mantiene aproximadamente la distribución 50%-50% de los datos.

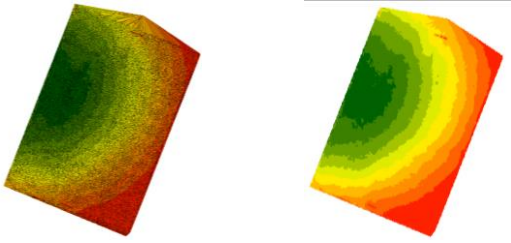
Los dos modelos digitales TIN y NN mantienen la menor magnitud en desviación estándar presentados a continuación, siendo para el levantamiento convencional: (a) TIN y (b) NN. Para los datos obtenidos de imágenes aéreas son (c) como TIN y (d) NN. (Figura 5)

Figura 5: Modelos Digitales de Elevación

(a) (b)



(c) (d)



Fuente: Elaborado por el autor

Se definió la precisión (P) con el uso de la media aritmética (X), para cada atributo (x, y, z) y el uso de la desviación estándar muestral (s), este dando un valor numérico medio y su tolerancia o margen de error estadístico, entre más pequeño sea el rango de proporción (±) negativo y positivo, mayor será su precisión a la centralización geométrica de los datos (Tabla 3).

Tabla 3: Precisión por método de levantamiento

	PRECISIÓN	X	Y	Z
MÉTODO	PUNTOS BÁSICOS	511903,361 ± 33,878	596790,905 ± 26,64	2559,027 ± 0,155
	PUNTOS BÁSICOS MÁS GRILLA	511901,875 ± 32,859	596789,383 ± 25,365	2559,038 ± 0,15
	PUNTOS DRON MULTI-POINT	511902,943 ± 33,328	596790,799 ± 24,549	2557,958 ± 0,848

Fuente: Autores

Tabla 4: Diferencia en puntos de control

DIFERENCIAS			
PUNTO	COORDENADAS - UTM - Z18N (WGS-84)		
	E	N	Z
1	-0,013	0,034	-0,947
2	0,003	0,045	0,949
3	0,054	0,098	0,938
4	-0,057	0,048	-0,881

Fuente: Autores

Resumiendo, en las tres diferencias (Δx,Δy,Δz), (Tabla 4), para cada uno de los cuatro puntos, dando variaciones tanto positivas como negativas relativas a la posición de la superficie, con una mayor magnitud en el atributo Z o cota de elevación del terreno respecto a la topografía convencional.

Conclusiones

La estadística inicial realizada en la tabla 15 muestra el comportamiento de los parámetros de centralización y de dispersión, donde en la desviación estándar para los Puntos Básicos y los Puntos Básicos más Grilla muestra una reducción en las coordenadas x, y, z, observando una relación proporcional al aumento de datos, a mayores datos, menor la separación a su media aritmética. Por otro lado, la gran cantidad de información suministrada por las imágenes aéreas con 31450, reduce su desviación estándar en la dirección Este, pero sin superar en Norte y Cota al levantamiento convencional. Los demás parámetros no mantienen cambios importantes en su distribución gráfica, con un coeficiente de variación igual para el básico y el de UAV, en Norte y Este, pero distorsionando su componente en altura. A mayor información el error medio absoluto es más bajo, pero no es su Cota.

Para los parámetros arrojados de los cinco métodos de interpolación, se evalúa su desviación estándar, al ser un componente geométrico considerado en su dispersión de altura. Siendo el formato TIN y NN quienes conservan la menor magnitud, seguidos del IDW, KRIGING y SPLINE con el valor más alto. Dada por su arquitectura triangular el TIN conserva sus propiedades con sus vecinos cercanos dando una proyección continua en el cálculo, así como el Natural Neighbor asociando sus pares inmediatos y suavisando los datos cercanos.

Tomando la precisión para los componentes de coordenadas, como la tolerancia entre la centralización geométrica de los datos y su cercanía a cada uno de ellos, el método mediante topografía convencional y adicionando su grilla para el aumento de puntos, conserva los valores en precisión menos alejados de su media aritmética en x, y, z. Aun así, los valores son similares entre los puntos básicos sin adición y los generados con el procesamiento de fotografías aéreas en sus variables Norte (X) y Este (Y), pero muy superior en Cota (Z).

Para los histogramas de frecuencia sobre los datos originales, exhiben un comportamiento dispar, debido a la diferencia de altura, por un lado, los Puntos básicos más grilla presenta una distribución uniforme en su centro, a izquierda y derecha dando una campana de Gauss poco suavizada, con tendencia de sus datos a derecha; caso contrario en la disposición de los Puntos con Dron, inclinando su centro de datos a izquierda y disminuyendo a derecha, observando una campana de Gauss a izquierda más suavizada, debido a la alta cantidad de puntos, y con un desfase de 6.82% entre la media y sus variables, 2.61% menor al primero.

Los raster productos de las interpolaciones para los Puntos Básicos, mantienen su forma uno respecto al otro siendo el SPLINE el más desigual en razón a su clasificación de color; Los Puntos más grilla generan mayor detalle, suavizando celdas puntuales y revelando nuevos cambios de altura discretos, debido a la adición de puntos mediante la cuadricula. Entre estos dos métodos y el realizado con los Puntos UAV, revela en este último un patrón distinto, demasiado uniforme para ser un terreno natural, sin pendientes artificiales, una imagen circular central y su distribución radial en altura y distancia. Partiendo de la verificación de las fotografías aéreas, y visita in situ, se notan desniveles puntuales que no se ven reflejados en ninguno de los modelos digitales, de este método. Presentando problemas futuros de cálculos de volúmenes o cualquier medición en altura, estando muy alejado de su verdadera forma.

Como diferencias finales se evaluaron cuatro puntos en ambos levantamientos (Tabla 4), demostrando un error sustancial en su atributo Cota, más de 88 centímetros en todos los puntos y un error de más del 3%, manteniéndose equitativamente en todos los puntos, y para Norte y Este siendo el Punto 3 con la falta más alta de 9 centímetros, seguido del Punto 4 en Este y 2-4 en Norte.

Por último el presente proyecto concluye, que ambos levantamientos son complementarios, teniendo en cuenta que el método tradicional supera mayormente en el atributo altura (Cota), ya que las imágenes sufren distorsiones, referente a su fuente de iluminación pasiva (Sol) y su diferente refracción en las superficies, dependiendo estas si son homogéneas o no, el terreno levantado, en grama natural, presenta unas tonalidades en verde, sin cambios notables o estructuras que el software pudiera usar como patrón, aun así la cantidad de datos y la maneras en que esta información se aprovecha visualmente y para modelos 3D, es a tener en cuenta. La topografía convencional consume bastante más tiempo y personal que el uso de vehículos aéreos tripulados remotamente, pero no sacrifica en precisión. Dependiendo del trabajo en donde se implemente cada levantamiento se medirá su eficacia y se complementaran aumentando su precisión y calidad en productos finales.

Referencias bibliográficas

Aguirre de Mata, J. (2016). Calibración geométrica de cámaras no métricas. Estudio de metodologías y modelos matemáticos de distorsión. España: Universidad Politécnica de Madrid.

ArcGeek. (2 de Mayo de 2018). acolita.com. Obtenido de Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW): https://acolita.com/interpolacion-con-la-distancia-inversa-ponderada-idw/

ArcGeek. (25 de Abril de 2018). acolita.com. Obtenido de Geoestadística, interpolación con Kriging: https://acolita.com/geoestadistica-interpolacion-con-kriging/

Barragán, W. B., De la Rosa, L. y Aparicio, L. E. (2020). Modelo para evaluación de la exactitud de escáner láser terrestre. Revista Logos Ciencia y Tecnología, 12(1), 45-57. https://doi.org/10.22335/rlct.v12i1.1019

Barragán, W. y Campos, A. (2016). Automatic generation of building mapping using digital, vertical and aerial high resolution photographs and lidar point clouds. The Interna-tional Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B7, 171-176. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-171-2016

COLOMTOPO S.A.S. (Agosto de 2020). Colomtop. Obtenido de Estaciones SANDING ARC 5: https://colomtop.wixsite.com/colomtop/copia-de-es-105

Baron Fernández, R., & Romero, N. (2016). Validación de la triangulación Delaunay empleando algebra geométrica conforme. Mexico: Instituto Politécnico Nacional.

Emery, X. (2013). Geoestadística. Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

ESRI. (Agosto de 2020). desktop.arcgis.com. Obtenido de ¿Qué es una superficie TIN?: https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm

ESRI. (2020). pro.arcgis.com. Obtenido de Cómo funciona Kriging: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm

ESRI. (Agosto de 2020). desktop.arcgis.com. Obtenido de Cómo funciona Vecino natural: https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm

ESRI. (Agosto de 2020). desktop.arcgis.com. Obtenido de Cómo funciona Spline: https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-spline-works.htm

Fernández Garcia, F. (2015). Fotografía aérea histórica e historia de la fotografía aérea en España. Ministerio de Economía y Competitividad, 217-240.

FisicaLab. (2020). www.fisicalab.com. Obtenido de Errores en la medición: https://www.fisicalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos

Garzón, J. (2013). Validación cruzada como método de investigación en la calidad de Modelos Digitales de Elevación. Quito Perú: Universidad San Francisco de Quito.

GEOBIT. (Agosto de 2020). Agisoft Lens. Obtenido de www.agisoft.es: https://www.agisoft.es/products/agisoft-lens-2/

Gildardo Henao, R. (2015). Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2007). Conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencias de la tierra: manejo y aplicación. Geoenseñanza, 2-11.

Heras Molinos, A. H. (2011). Instrumentos Topográficos de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Jiménez, J. G. (20 de SEPTIEMBRE de 2020). jesusgarciaj.com. Obtenido de La curva de distribución normal o "Campana de Gauss": https://jesusgarciaj.com/2010/01/22/la-curva-de-distribucion-normal/

Martínez Quintana, R. (2009). Estadística básica para topografía. España: Universidad de Extremadura.

Melo Martínez, C. E. (2012). Análisis Geoestadístico Espacio Tiempo Basado en Distancias y Splines con Aplicaciones. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Montero, J. (18 de MARZO de 2016). www.todrone.com. Obtenido de To Drone: https://www.todrone.com/diferencias-hay-entre-rpa-uav-rpas-uas-dron/

Morales, W. G. (2015). Texto básico autoformativo de topografía general. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.

Peiro Ucha, A. (2020). economipedia.com. Obtenido de Coeficiente de correlación lineal: https://economipedia.com/definiciones/coeficiente-de-correlacion-lineal.html

Ruiz Sabina, J. A., Gallego Valle, D., Peña Ruiz, C., Moreno García, J. M., & Gómez Laguna, A. (2015). Fotogrametría aérea por drone en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del Campo de Montiel. Virtual Archaeology Review, 5-19.

Salazar P., C., & del Castillo G., S. (2018). Fundamentos Básicos de Estadística. Ecuador: Del Castillo Galarza, Raúl Santiago.

Santamaria Peña, J., & Sanz Mendez, T. (2011). Fundamentos de Fotogrametría. España: Universidad de la Rioja.

Tacca Qquelca, H. (2015). Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.

Salazar, C., & Del Castillo, S. (2018). Funtamentos básicos de estadística.

Sitio big data. (27 de Agosto de 2018). https://sitiobigdata.com. Obtenido de Aprendizaje automático y las métricas de regresión: https://sitiobigdata.com/2018/08/27/machine-learning-metricas-regresion-mse/#

Universidad Politécnica de Valéncia. (2009). Fotogrametría. España: Universidad Politécnica de Valéncia.

Universidad Internacional de Valencia. (24 de 04 de 2018). www.universidadviu.com. Obtenido de RPAS, UAV y drones: ¿Cuáles son las diferencias?: https://www.universidadviu.com/rpas-uav-drones-cuales-las-diferencias/

Vazquez, J. C., & Backhoff, M. (2017). Procesamiento geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte. México: Sanfandila.