

Aplicación de la tecnología VANT para el cálculo de volúmenes de movimientos de tierra

Application of technology UAV for the calculation of earthmoving volumes

Juan Carlos Fernández-García^{1,*}, Luis Enrique Acosta-González², Enrique Leandro Carballo-Hernández¹, Rosendo Romero-Andrade³

¹ Departamento de Construcciones. Avenida XX Aniversario s/n, Piedra Blanca. Universidad de Holguín, Cuba. Universidad de Holguín, Cuba.

² Centro de Estudios CAD/CAM. Campus “Oscar Lucero Moya”, Avenida XX Aniversario s/n, Piedra Blanca. Universidad de Holguín, Cuba.

³ Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: jkfernandez@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 15 agosto 2021 **Aceptado:** 31 agosto 2021 **Publicado:** 4 de septiembre 2021

Resumen

Los avances tecnológicos surgidos en los últimos años, han permitido que los procesos constructivos a nivel mundial dispongan de nuevas herramientas para facilitar los trabajos de la gestión de proyectos y control de obras en las diferentes fases del proceso inversionista. El cálculo de volúmenes de movimientos de tierra es una de las etapas fundamentales en el proceso de ejecución de estas obras, donde se requiere lograr un control efectivo de la cantidad de tierra removida en las áreas de su proyección y emplazamiento. El objetivo de este trabajo consiste en la utilización de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) como un nuevo método para la determinación del volumen de tierra en el control y certificación de la obra. Mediante la ejecución de vuelos en diferentes momentos de la zona de estudio y su procesamiento, se obtiene la nube de puntos para generar el Modelo Digital del Terreno (MDT), lo que permite calcular el volumen del movimiento de tierra realizado. Se realizó un análisis previo de los resultados por el método directo (levantamiento en campo), que posibilita la comprobación de los resultados. Se concluye que el método de levantamiento aéreo garantiza el grado de precisión exigido en la estimación de volumen de movimiento de tierra.

Palabras clave: VANT, control de obra, nube de puntos, MDT

Abstract

The technology advances that have emerged in recent years have allowed construction processes worldwide to have new tools to facilitate the work of project management and control of works in the different phases of the investment process. The calculation of volumes of earth movements is one of the fundamental stages in the process of execution of these works, where it is necessary to achieve an effective control of the amount of earth removed in the areas of its projection and location. The objective of this work consists in the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as a new method for determining the volume of land in the control and certification of the work. Through the execution of flights at different times in the study area and their processing, the point cloud is obtained to generate the Digital Terrain Model (DTM), which allows calculating the volume of the ground movement carried out. A previous analysis of the results was carried out by the direct method (field survey),

which makes it possible to verify the results. It is concluded that the aerial survey method guarantees the degree of precision required in estimating the volume of earth movement.

Keywords: VANT, site control, point cloud, MDT

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) tienen un gran potencial en el control de obra, ya que puede desplazarse rápidamente sobre un terreno irregular o accidentado y superar cualquier tipo de obstáculo [1, 2]. Ofrecen información recogida por diferentes sensores para facilitar, por ejemplo, el cálculo del volumen de tierra en el control de obra en un periodo concreto. La ruta realizada por el dron puede repetirse cada cierto periodo de tiempo y así controlar el estado de la obra (evolución).

La aplicación de los VANT como nueva tecnología en la gestión de proyectos es una tarea actual que responde a aspectos fundamentales como son: el ahorro y fiscalización de recursos, rapidez en la ejecución de los trabajos, competitividad en el campo, control interno, la formación del profesional e informatización de la sociedad [3-6]. En este contexto, los métodos tradicionales no brindan una respuesta objetiva, principalmente con relación a la inmediatez y precisión que se requiere en la obtención de los resultados.

Constituye una prioridad del sector empresarial cubano perfeccionar los servicios ingenieros de topografía y estar al nivel de los estándares internacionales. Actualmente se manifiesta la necesidad de establecer controles más rigurosos durante el proceso de certificación obras, máxime ante las exigencias del proceso inversionista, donde son frecuentes desacuerdos y litigios en cuanto al proceso de facturación del volumen del movimiento de tierras. El objetivo de este trabajo consiste en la utilización de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) como un nuevo método para la determinación del volumen de tierra en el control y certificación de la obra.

La tecnología VANT para el cálculo de volumen de tierra

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT por sus siglas en español y UAV por sus siglas en inglés) son sistemas de aviación diseñados con el propósito de realizar operaciones aéreas sin piloto a bordo, con la posibilidad de ser controlado a distancia o ser pre-programados para realizar vuelos de forma autónoma. En algunos casos pueden estar diseñados para llevar cargas [7-8], pudiendo reutilizarse y de acuerdo con sus requerimientos de operación, tener diferentes mecanismos de propulsión, capaces de mantener el nivel de vuelo controlado y sostenido [9-10].

Los VANT se han convertido en una herramienta muy versátil en diversas ramas de la ingeniería y gracias a la rápida evolución tecnológica que experimentan, sus características han ido mejorando a la vez que los costos de adquirirlos y operarlos han disminuido, al punto de estar al alcance de instituciones con bajos presupuestos [7, 10].

Un aspecto particular de los VANT es la posibilidad de realizar levantamientos topográficos de manera rápida. Las imágenes de alta resolución espacial y temporal se pueden convertir en modelos digitales de ingeniería (MDE, *model-driven engineering*), gracias a las técnicas de fotogrametría, utilizando para ello programas especializados de cómputo como el software PhotoScan. Sin embargo, dichas imágenes provienen de una plataforma aerotransportada sensible a los efectos climáticos locales como ráfagas de viento y diferenciales de temperatura en el aire. Además, la cámara fotográfica y los sensores internos del VANT como GPS, altímetro, sensores inerciales IMU

y otros usados para la ubicación correcta de las imágenes en el espacio, no poseen la precisión de equipos fotogramétricos profesionales [11-12].

Todo lo anterior contribuye a que los modelos obtenidos posean un error intrínseco. Existen técnicas de control y de post proceso que permiten mejorar dichos modelos, pero para establecer una medición cuantitativa de su error, es necesario compararlos con otros modelos de métodos ya establecidos, como la topografía de precisión.

Los VANT pueden ser utilizados en cualquiera de las etapas de ejecución de los trabajos de movimiento de tierra, gracias a la capacidad como dispositivo aéreo de recolectar un gran volumen de información en tiempo real que permite cubrir grandes extensiones de terreno, en relativamente poco tiempo. Pueden alcanzar lugares de difícil acceso reduciendo la exposición al riesgo de los obreros y operarios en la obra, al ejecutar tareas de control de obra, levantamientos topográficos e inspección, de manera parcialmente robotizada. Permiten llevar a término estas operaciones a través de una vía confiable, precisa, oportuna, repetible y más eficiente que la convencional, algo que persigue la industria de la construcción del siglo XXI, adecuada a las nuevas tecnologías.

Fotogrametría con VANT

Con los drones equipados con cámara y sensores es posible realizar mediciones y determinar situaciones espaciales [1, 3, 6, 11]. Al trabajar con una foto, se pueden obtener datos en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos fotos en la zona común a éstas (zona de solape), se podrá tener visión estereoscópica o, dicho de otro modo, información tridimensional.

La Fotogrametría [13] es una herramienta para elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo unos condicionantes específicos. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno. En la Figura 1 se muestra de manera general, la operacionalización de esta tecnología.



Fig.1 Operacionalización de la fotogrametría aérea

2. Materiales y Métodos

En la presente investigación se propone un procedimiento para el uso de la tecnología VANT en el cálculo de volumen de movimiento de tierra, que ha sido aplicado en el Polígono Patrón de la Universidad de Holguín (Figura 2). Consta de tres fases o etapas fundamentales, la primera se refiere a la planificación del vuelo con el VANT para realizar la fotogrametría. La segunda fase se dedica al análisis de las fotografías tomadas durante el vuelo. En la última fase, se obtiene el modelo digital de ingeniería (MDT).

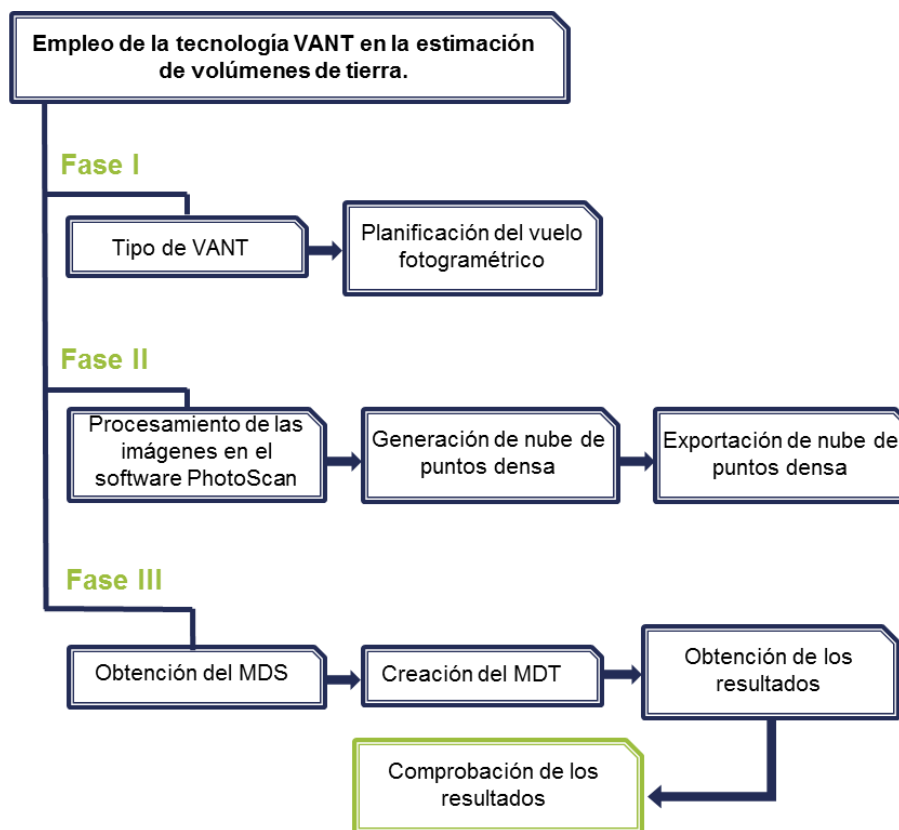


Fig.2 Procedimiento para el empleo de la tecnología VANT

3. Resultados y Discusión

La cantera de material areno-arcilloso destinada a la fabricación de ladrillos escogida para la realización del presente estudio, se encuentra en el área que abarca el Polígono Patrón de Topografía, en el Campus “Oscar Lucero Moya” de la Universidad de Holguín (Figura 3), localizada 20°53’39.24” Norte de latitud y 76°14’28.52” Oeste de longitud en el municipio de Holguín.

Se utilizó un dron multirrotor, modelo Trimble ZX5 que está diseñado para realizar trabajos a gran velocidad, incluso en espacios muy reducidos [14]. No necesita catapulta de lanzamiento, es fácil de ensamblar e incluye todo lo necesario para capturar fotos georeferenciadas de alta calidad a través de su cámara Olympus de 16 MP.

El diseño del vuelo se hace en función de la resolución o de la escala que se pretenda obtener, del tipo de terreno, su ubicación, la extensión a relevar y condiciones meteorológicas imperantes, fundamentalmente la velocidad del viento. Las precisiones de los resultados dependen de la relación altura de vuelo – resolución de la cámara. En líneas generales, se realizó un plan de vuelo definiendo

recorridos con *waypoints* que constituyen la ruta que seguirá el *drone* capturando imágenes (Figura 4).



Fig.3 Localización de la cantera, objeto de estudio



Fig.4 Planificación del vuelo

Para la delimitación de la zona de vuelo se utilizó en este caso una imagen georreferenciada que fue exportada al programa *Mission Planner* desde el cual se planifica la misión. La Tabla 1 recoge los parámetros fundamentales que responden a la planificación del vuelo.

Durante esta investigación solo se tomaron 12 imágenes en 12 posiciones diferentes del VANT, debido a que el área donde se encuentra el objeto de estudio es pequeña. Luego se hizo necesario la orientación de las imágenes, donde el centro de cada fotografía tomada tiene una posición, la cual es asignada por el software del VANT. A continuación, se cargan los puntos de control, por último, al optimizar la orientación de la cámara se ajustan todos los coeficientes de distorsión y se obtuvo que el error total del modelado es de apenas 0,49 mm.

El software PhotoScan permitió crear y representar una nube densa de puntos, basándose en las posiciones calculadas de las imágenes. El software calcula el mapa de profundidad para cada imagen y, sobre la base de estas, construye la nube densa de puntos, en este caso de 3 840 922 puntos en total. También se obtuvo el modelo MDS (Figura 5).

Tabla 1. Parámetros fotogramétricos durante el vuelo

Datos de la cámara	
Tamaño de imagen	4912 x 3264 pixel
Tamaño del sensor	23,5 x 15,6 um
Resolución	4,8 um
Distancia focal	20 mm
V.Obturación	1 segundo
Solape longitudinal	70%
Solape transversal	60%
Datos del vuelo	
GSD	3,5 cm
Altura media de vuelo	146 m
Superficie cubierta	0,0798 km ²

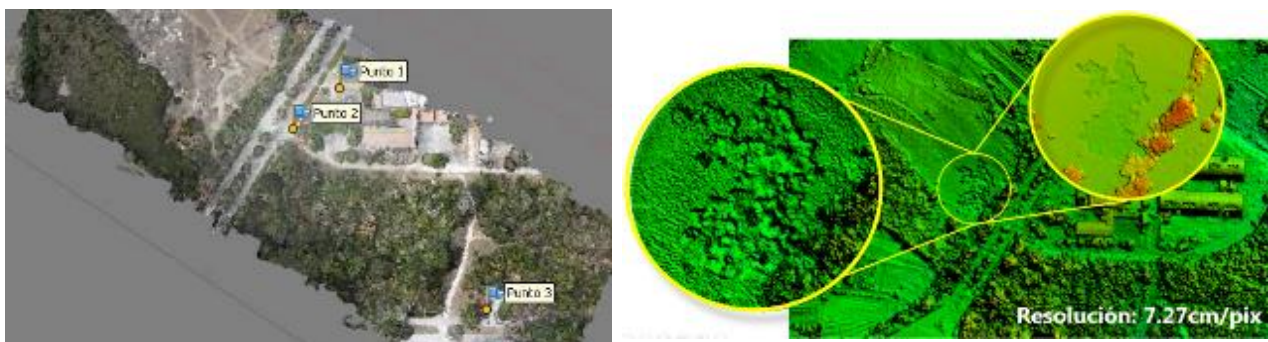


Fig.5 Nube de puntos densa en el software PhotoScan (izquierda) y MDS obtenido en el software PhotoScan (derecha)

Una vez obtenido el MDS y el ortomosaico, solo queda pendiente exportar ambos. Específicamente se exporta en formato TIFF/Geo TIFF (*.tif). En el software *Global Mapper*, se procede a eliminar cualquier objeto o vegetación que se encuentre en el área de análisis para posteriormente crear el MDT (Figura 6).

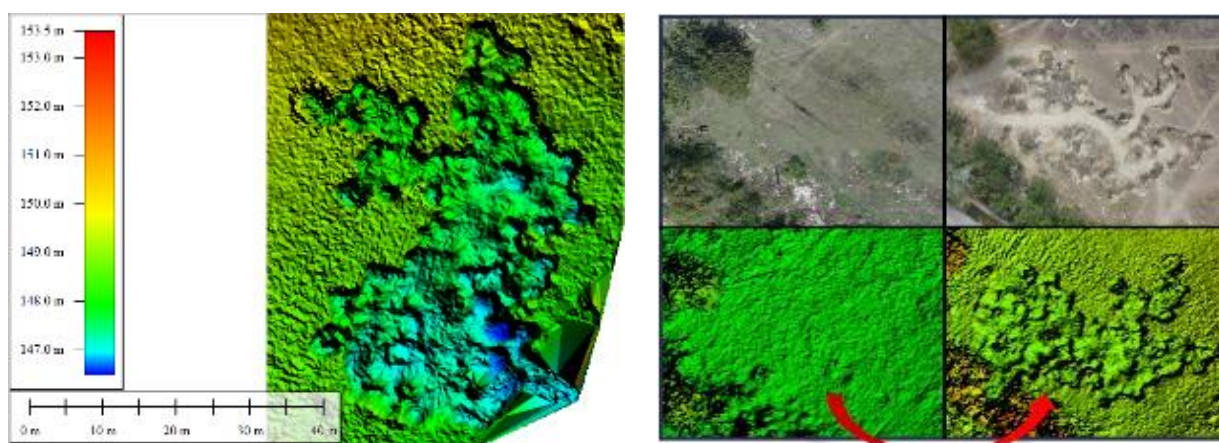


Fig.6 MDT (izquierda) y superficies para el cálculo de volumen, obtenidos en el software Global Mapper

El volumen de tierra se obtiene a través de la diferencia de superficies (Figura 6). En el software *Global Mapper* mediante la herramienta "*Measure Volume Between Surfaces*" que se accede desde el panel "*Analisis*", se introducen las superficies, la inicial y la secundaria obteniendo el volumen resultante de $1035,6344 \text{ m}^3$. Para la comprobación de este resultado a través de la tecnología VANT, se realizó paralelamente un cálculo de volumen de tierra en la misma área de estudio utilizando los métodos tradicionales topográficos (Figura 7), utilizando la base geodésica del Polígono Patrón de la Universidad de Holguín (en este caso solo los puntos 220B y 221B) y así establecer una comparación entre ambos.

El levantamiento planimétrico y altimétrico se realizó por el método taquimétrico, partiendo de la base geodésica existente en el Polígono Patrón del campus "Oscar Lucero Moya" de la Universidad de Holguín. Se incluyó toda la información de interés a partir del establecimiento de los piquetes en los puntos característicos de la cantera, para un total de 54 puntos (Figura 7) en un área de $1170,42 \text{ m}^2$, que garantiza la densidad de puntos suficiente para realizar el cálculo de volumen a partir de la descomposición de figuras (método tradicional). Para el procesamiento de los datos se empleó como apoyo el software AutoCAD, obteniendo como resultado un volumen de $1156,072 \text{ m}^3$.



Fig.7 Polígono replanteado por métodos tradicionales (izquierda) y Polígono resultante de las mediciones topográficas en el software AutoCAD (derecha)

Los resultados del análisis comparativo entre los cálculos de volúmenes de tierra por los métodos tradicional y a través de los VANT se muestran en las Figuras 8 y 9. En la Tabla 2 se muestra el análisis comparativo del cálculo de volumen por el método tradicional y la tecnología VANT.

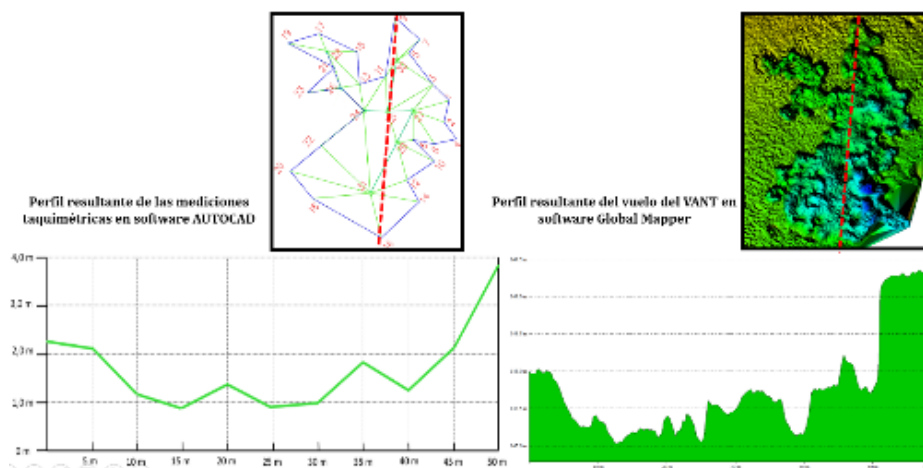


Fig.8 Comparación de perfiles en ambos métodos

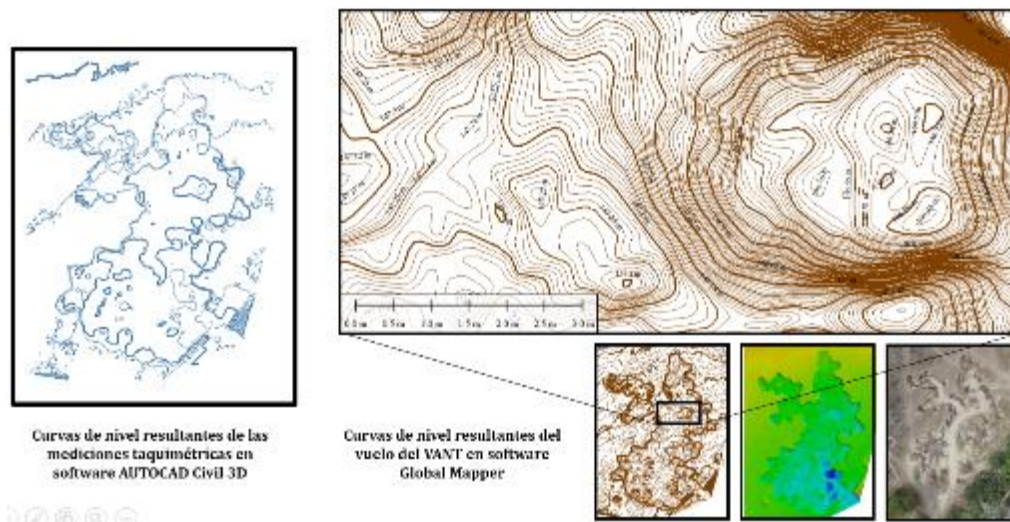


Fig.9 Comparación de curvas de nivel en ambos métodos

Tabla 2. Análisis comparativo del cálculo de volumen por el método tradicional y la tecnología VANT

Cálculo de volumen			
Método	Puntos levantados	Volumen(m ³)	Diferencia(m ³)
Tradicional	54	1156,072	
VANT	81837	1035,634	120,438

La discrepancia de 120,44 m³ obtenida al comparar los dos métodos, se debe fundamentalmente a la diferencia de las áreas. En el caso del levantamiento directo esta se generaliza, es decir, los puntos se colocan de una manera más espaciada, sin embargo con la tecnología VANT los puntos se colocan a 10 cm de distancia. Además, se estima que se hayan extraído 50 m³ desde el momento de la realización del vuelo y la data del levantamiento taquimétrico (un día después).

4. Conclusiones

Los datos obtenidos a partir de los levantamientos aéreos con VANT proveen resultados de alta calidad como la nube de 189 puntos/m², permitiendo calcular volumen con una elevada exactitud. Se pudo comprobar que el MDT obtenido con los VANT resulta confiable y preciso, atenuando errores que se introducen en los levantamientos directos, existiendo diferencias de hasta de un 6% en el cálculo de volumen entre ambos métodos. La tecnología VANT facilita el trabajo interdisciplinario en el control y certificación de obras, a partir del uso de los resultados de la fotografía aérea, su procesamiento y análisis multifuncional, lo que permite un acertado pronóstico del volumen de tierra.

Referencias

1. Kumarapu, K., Shashi, M., Keesara, V.R., *UAV in Construction Site Monitoring and Concrete Strength Estimation*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021. **49**: p. 619-627. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01246-w>.

2. Jardine, P.T., Givigi, S., *Improving Control Performance of Unmanned Aerial Vehicles through Shared Experience*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01387-1>.
3. Xu, C., Liao, X., Ye, H., *Iterative construction of low-altitude UAV air route network in urban areas: Case planning and assessment*. Journal of Geographical Sciences, 2020. **30**: p. 1534-1552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1798-4>.
4. David, C.G., Kohl, N., Casella, E., Rovere, A., Ballesteros, P., Schlurman, T., *Structure-from-Motion on shallow reefs and beaches: potential and limitations of consumer-grade drones to reconstruct topography and bathymetry*. Coral Reefs, 2021. **40**: p. 835-851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02088-9>.
5. Ybañez, R.L., Ybañez, A.A.B., Lagmay, A.M.F.A., Aurelio, M.A., *Imaging ground surface deformations in post-disaster settings via small UAVs*. Geoscience Letters, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00194-8>.
6. Rizo-Maestre, C., González-Avilés, A., Galiano-Garrigós, A., Andújar-Montoya, M.D., Puchol-García, J.A., *UAV + BIM: Incorporation of Photogrammetric Techniques in Architectural Projects with Building Information Modeling Versus Classical Work Processes*. Remote Sens, 2020. **12**(14): 2329. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142329>.
7. Gandolfo, D.C., Rosales, C.D., Salinas, L.R., Jimenez, J., Carelli, R., *Low-cost Position and Force Measurement System for Payload Transport Using UAVs*. International Journal of Automation and Computing, 2021. **18**: p. 594-604. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11633-021-1281-4>.
8. Lieret M., Lallinger M., Tauscher M., Franke J., *Localization and grasping of small load carriers with autonomous unmanned aerial vehicles*. (Eds) Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics, 2020. Springer: Berlin-Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-61755-7_22.
9. Alulema, V., Valencia, E., Cando, E., Hidalgo, V., Rodriguez, D., *Propulsion Sizing Correlations for Electrical and Fuel Powered Unmanned Aerial Vehicles*. Aerospace, 2021. **8**: 171. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8070171>.
10. Amici, C., Ceresoli, F., Pasetti, M., Saponi, M., Tiboni, M., Zanoni, S., *Review of Propulsion System Design Strategies for Unmanned Aerial Vehicles*. Applied Sciences, 2021. **11**: 5209. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11115209>.
11. Kangunde, V., Jamisola, R.S., Theophilus, E.K., *A review on drones controlled in real-time*. International Journal of Dynamics and Control, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00737-5>.
12. Delavarpour, N., Koparan, C.; Nowatzki, J., Bajwa, S., Sun, X., *A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges*. Remote Sens, 2021. **13**: 1204. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13061204>.
13. Thieler E.R., Hapke C.J., *Photogrammetry*. (Eds) Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2019. Springer: Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_244.
14. Yang, H., Lee, Y., Jeon, S.Y., *Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation*. Intelligent Service Robotics, 2017. **10**: p. 79-93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11370-017-0224-y>

Agradecimientos

Los autores agradecen a los colaboradores de la empresa GEOCUBA Oriente Norte, a los técnicos y especialistas del Taller de Geodesia de la Agencia GEOCUBA Holguín, por los datos y el apoyo en las investigaciones de campo y gabinete.

Conflicto de Intereses

Los autores consideran que no hay conflicto de intereses

Contribución de los autores

Juan Carlos Fernández García. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5092-950X>

Participó en el diseño de la investigación, las mediciones de campo, el dibujo del levantamiento topográfico en AUTOCAD, procesamiento de las imágenes VANT en Global Mapper, PhotoScan y redacción del manuscrito.

Luis Enrique Acosta González. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2723-9850>

Participó en el diseño de la investigación, las mediciones de campo, el procesamiento de las imágenes VANT en Global Mapper, PhotoScan, la revisión y redacción del manuscrito.

Enrique Leandro Carballo Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6502-3535>

Participó en el diseño de la investigación y las mediciones de campo.

Rosendo Romero Andrade. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3786-0576>

Participó en el diseño de la investigación, la revisión y redacción del manuscrito.