

Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados

Sergio Arriola Valverde¹

sarriola@tec.ac.cr

Amit Ferencz Appel²

aferencz@estudiantec.cr

Renato Rimolo-Donadio¹

rrimolo@tec.ac.cr

Como una extensión de la fotografía aérea, la fotogrametría terrestre es una técnica que permite estudiar zonas geográficas a partir de imágenes y diversos sensores, con el fin de extraer información útil en aplicaciones tales como agricultura de precisión, inspección de estructuras y ordenamiento urbano y vial, entre muchas otras. En conjunción con sistemas autónomos no tripulados (UAS), comúnmente denominados *drones*, se pueden alcanzar altas resoluciones temporales y espaciales a cambio de una cobertura modesta. En el Laboratorio de Fotogrametría de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se exploran estas técnicas y tecnologías desde hace poco más de tres años; actualmente se cuenta con experiencia y equipo capaz de generar productos fotogramétricos con resoluciones de hasta un centímetro por pixel (1 *cm/pixel*). En este artículo se introduce la técnica, así como los sistemas y procedimientos necesarios para la obtención de productos fotogramétricos para aplicaciones científicas.



Vista aérea tomada desde el campus del TEC con un UAS multirrotor, dirigido hacia las montañas aledañas al Volcán Irazú.

Fotogrametría terrestre

De acuerdo con la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS) [1], la fotogrametría se define como el arte, ciencia y tecnología para obtener información confiable sobre objetos físicos y el ambiente, a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiada u otras emisiones. En relación con las aplicaciones de observación terrestre, este campo del conocimiento converge con otras disciplinas tales como geodesia, cartografía y topografía, las cuales constituyen en conjunto una disciplina integrada denominada *geoinformática* o *geomática* [2].

La adquisición de datos en estudios fotogramétricos comúnmente se realiza a través de fotografía digital en banda visible y sensores remotos tales como cámaras multispectrales o escáneres láser, en combinación con información proveniente de sistemas de posicionamiento global. Estos datos se manipulan posteriormente con herramientas de procesamiento y sistemas de información geográfica (GIS) para obtener productos diversos como modelos digitales de elevación (DEM) u ortomosaicos.

La toma de datos se realiza en diferentes niveles asociados con alturas y coberturas definidas, así como con resoluciones espaciales y temporales específicas. A escala global, las imágenes satelitales proveen la mayor cobertura, pero con una resolución

limitada que oscila entre centenas de metros hasta varias decenas de centímetros en el mejor de los casos. Las condiciones atmosféricas pueden afectar este proceso; nubosidad u otros fenómenos atmosféricos obligan a corregir las imágenes (corrección atmosférica) así como también la curvatura terrestre (ortorrectificación). Aunque la resolución temporal, es decir, la frecuencia temporal a la cual se toman los datos, puede llegar a ser alta cuando se persiguen buenas resoluciones y alta cobertura, el inmenso volumen de datos es la principal limitación y típicamente la información se actualiza en términos de semanas. Existen diversas instituciones y empresas que ofrecen imágenes satelitales para fines científicos y comerciales, a través de diversos proyectos como, por ejemplo, Landsat [3] o Worldview [4]. Otros medios para la toma de datos pueden ser aviones tripulados o globos, con los cuales se alcanzan resoluciones espaciales y temporales intermedias, pero a un costo relativamente alto. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) [5] constituyen una alternativa que se ha popularizado más recientemente fuera del ámbito militar; con estas tecnologías se alcanzan las mejores resoluciones espaciales ya que permiten la operación en baja altura. Otra ventaja asociada con la baja altura es la poca interferencia atmosférica, dado que las imágenes se toman por lo general con ninguna o escasa nubosidad. La resolución temporal es alta debido a la facilidad con que se pueden repetir las misiones por su bajo costo en comparación con otras alternativas. Los retos de las tecnologías UAV se relacionan principalmente con la cobertura espacial máxima y las limitaciones en el poder de cómputo requerido para procesar los datos luego de ser adquiridos.

El procedimiento típico para un levantamiento fotogramétrico a baja altura se ilustra en la figura 1, donde se muestra una aeronave recorriendo una zona en estudio a lo largo de la cual se recolectan datos e imágenes georreferenciados, los cuales luego



Figura 1. Esquema conceptual sobre el procedimiento para realizar un levantamiento fotogramétrico terrestre: El vehículo aéreo se programa para seguir una trayectoria autónoma, durante la cual toma datos e imágenes de toda la superficie bajo estudio con suficiente redundancia (traslape) para su posterior procesamiento.

son procesados conjuntamente. El procedimiento se describe con más detalle adelante.

Sistemas autónomos no tripulados (UAS)

Las tecnologías de sistemas aéreos no tripulados (UAV, del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*), popularmente conocidas como drones, se han diversificado y popularizado masivamente en la última década con un amplio espectro de aplicaciones, desde recreativas hasta científicas. Como muestra, los drones para agricultura de precisión fueron catalogados como una de las diez tecnologías emergentes más importantes en el año 2014 por la revista MIT *Technology Review* [6]. La perspectiva e información que estos vehículos pueden dar con vuelos a baja altura es muy superior en términos de cobertura con respecto a operaciones terrestres, ofreciendo una resolución muy buena a un costo mucho menor en comparación con otras tecnologías.

Las denominaciones y terminología asociadas a tecnologías de drones son igualmente diversas y están basadas por lo general en ciertas características de los sistemas. Por ejemplo, cuando las aeronaves son pilotadas a distancia, usualmente se les refiere como sistemas aéreos pilotados remotamente (*Remotely Piloted Aircraft Systems*, RPAS), mientras que los sistemas que tienen la capacidad de hacer vuelos autónomos (piloto automático), se clasifican en la categoría de sistemas aéreos no tripulados o sistemas autónomos no tripulados (*Unmanned Autonomous Systems*, UAS). El término *sistema* hace la distinción de que las funcionalidades van más allá de un vehículo, debido a que además se transportan y controlan remotamente diversos sensores y cámaras para la adquisición de datos.

Las plataformas UAS para aplicaciones en fotogrametría se conocen como *drones de mapeo* (*mapping drones*), y normalmente tienen la capacidad de realizar vuelos autónomos. La toma de datos mediante pilotaje manual es compleja debido a la dificultad que representa controlar y sincronizar en tiempo real la trayectoria y la toma de datos de forma remota. Un sistema de vuelo automatizado recorre el área bajo estudio y toma datos de forma más controlada y sistemática mediante la programación previa de las secuencias. Esta capacidad, sin embargo, no

significa que se deba prescindir del control humano, ya que en ocasiones es necesario intervenir las misiones debido a eventos inesperados que comprometan la seguridad del sistema y su entorno, tales como eventos climáticos u obstáculos físicos.

Según la estructura de la aeronave, los drones pueden ser multirrotores o de ala fija. Mientras que los primeros asemejan más un helicóptero con múltiples rotores, los segundos funcionan bajo el principio de sustentación de un avión. Los sistemas multirrotores usualmente poseen entre cuatro y ocho rotores, son altamente maniobrables y pueden mantenerse en una posición fija durante el vuelo. Al poder sortear mejor los obstáculos pueden volar a muy baja altura, por lo que logran obtener mejor resolución espacial; sin embargo, son más lentos y tienen una autonomía limitada debido al alto consumo de los múltiples rotores, casi siempre por debajo de 30 minutos para sistemas de escala pequeña (menor a 2 kg). Los vehículos de ala fija usan uno o dos motores, lo que les confiere una autonomía mayor. Al volar más rápidamente y con menor esfuerzo cubren extensiones más amplias, pero deben volar a mayor altura, lo que limita la resolución espacial.

En cuanto a envergadura, los tamaños varían según la capacidad de carga (cámaras y sensores) que se requiera transportar. Existen sistemas con capacidad de carga de unos pocos kilogramos hasta alcanzar tamaños comparables a un avión tripulado. Las plataformas pueden ser comerciales, con diseños propietarios que el usuario final no puede adaptar o modificar; o abiertas, las cuales son modificables y expandibles de acuerdo con las necesidades particulares. El sistema de control y autopiloto define en gran medida el tipo de plataforma. Diversas alternativas como *PixHawk* [7] o *Paparazzi* [8] están disponibles con paquetes de software asociados para la programación de los sistemas. Las plataformas UAS, como se ilustra en la figura 2, se basan en un controlador central, el cual gobierna los motores y alerones mediante reguladores de velocidad y servomotores, respectivamente. El controlador de vuelo debe soportar tanto el control manual a través de un enlace de comunicación remoto, como la operación automatizada por un enlace de comunicación mediante telemetría. Los sistemas UAS cuentan con un GPS que permite determinar la ubicación de la aeronave en exteriores, así como

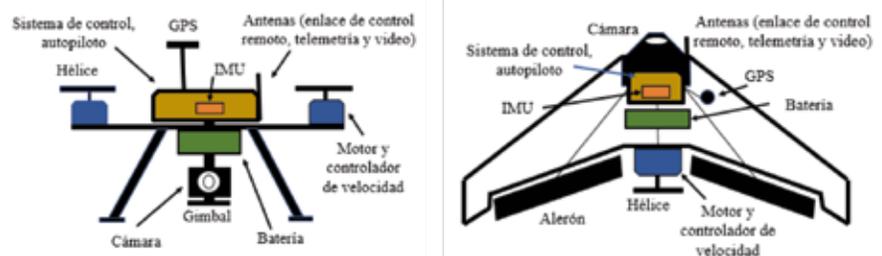


Figura 2. Diagrama de la estructura y principales componentes de un UAS: (a) multirrotor; (b) ala fija.



Figura 3. Ejemplos de plataformas multirrotores utilizadas en el Laboratorio de Fotogrametría del TEC: (a) sistema comercial DJI Phantom 3 Professional; (b) plataforma abierta basada en el controlador PixHawk 2.

una unidad de medición inercial (IMU) que determina su orientación espacial en términos de los ángulos de navegación (*pitch*, *roll*, *yaw*). La forma de alimentación más común en aeronaves pequeñas es por medio de baterías recargables de alta capacidad, usualmente de polímero de litio (LiPo). Los sensores se controlan desde el controlador central (CPU), y en el caso de cámaras es deseable contar con un sistema de estabilización (gimbal) para evitar que las vibraciones y movimiento de la aeronave distorsionen las imágenes. La visualización en vivo desde la aeronave hacia el control central se realiza mediante un enlace FPV (*First-Person View*); este componente facilita la operación y control de la aeronave al permitir su monitoreo durante el vuelo. En la figura 3 se ilustran algunas de las plataformas multirrotor que se utilizan en el Laboratorio de Fotogrametría del TEC.

Levantamientos fotogramétricos

En referencia a la figura 1, se ilustra el proceso de un levantamiento fotogramétrico, en el cual se recorre el área de interés con un patrón predefinido y se recolectan datos e imágenes sobre una retícula regular. Es importante que la información tenga suficiente redundancia para que esta pueda ser procesada posteriormente. Para las imágenes este requerimiento se transforma en una especificación de traslape, lo que implica que existen zonas adyacentes de superposición suficientemente amplias para que la reconstrucción, a través de puntos de coincidencia, sea posible. La resolución alcanzable es función de la altura de vuelo y las características del sensor, mientras que la cobertura depende del tipo de aeronave y su autonomía máxima (tiempo que se puede mantener en vuelo).

La precisión con que se recolectan los datos está asociada al sistema de posicionamiento y orientación que se utiliza para referenciar la recolección. Dado que por razones de costo la mayoría de sistemas UAS en la actualidad poseen un receptor *GPS* con una única frecuencia, el error espacial puede llegar a ser de varios metros. Este error se puede reducir si se utilizan puntos de control en tierra (GCP, *Ground Control Points*). Estos puntos se deben tomar con estaciones

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o RTK (*Real Time Kinematic*), que permiten obtener lecturas con precisión en el orden de pocos milímetros. Así, es posible reducir el error durante el procesamiento de datos hasta valores por debajo de un centímetro. Plataformas UAS más avanzadas pueden inclusive tener *GPS* diferenciales o *RTK* a bordo, con lo que se puede mejorar de forma importante la precisión espacial.

Si bien la fotografía digital RGB es el medio de adquisición más común, los levantamientos también se realizan con otras tecnologías como cámaras multispectrales (e.g. infrarrojo cercano), cámaras térmicas, y escáneres láser LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Estas alternativas permiten adquirir información adicional según la aplicación. Por ejemplo, el escaneo láser (TLS, *terrestrial laser scanning*) permite diferenciar vegetación y subsuelo, así como morfología de cauces de agua, lo cual no es posible únicamente con fotografía.

Procesamiento de datos y productos fotogramétricos

En vista de que la información que se recolecta con los levantamientos es segmentada, los datos se deben procesar con el fin de consolidarlos y poder elaborar los productos finales. En el caso de la fotografía RGB, el procedimiento involucra el alineamiento de las imágenes, la creación de la nube de puntos, y a partir de ahí la generación de mosaicos, modelos digitales de elevación o modelos tipo RASTER, en los cuales se asocia información adicional con cada punto del mapa de la zona bajo estudio. Las fases del proceso se llevan a cabo con software de fotogrametría, mientras que para el post procesamiento de los modelos RASTER se utilizan herramientas GIS. Esta tarea es la más exigente desde el punto de vista computacional, donde la cantidad de recursos es función del número de imágenes y la resolución deseada.

En la figura 4 se muestran ilustrativamente algunos productos obtenidos a partir de levantamientos fotogramétricos realizados por parte del Laboratorio de Fotogrametría del TEC. El procesamiento permite generar una nube de puntos densa, la cual se puede convertir en un modelo tridimensional del

terreno. El ortomosaico constituye la proyección ortorrectificada en dos dimensiones (2D) de la zona bajo estudio, mientras que el DEM indica la variación espacial de altura sobre el terreno estudiado. En el caso mostrado, el vuelo se llevó a cabo a una altitud media de 80 metros y se recopilaron alrededor de 600 fotografías con la plataforma *UAS DJI P3*. Los datos fueron tratados con el software de fotogrametría *Agisoft Photoscan Professional* [9], para una resolución espacial de 2,94 cm/píxel y un error de 3,46 metros. En la figura 5 se muestra el modelo tridimensional y el DEM obtenido de la parcela experimental de la Escuela de Ingeniería Agrícola en el campus central del TEC. En este caso se utilizaron puntos de control en tierra, por lo que la resolución espacial aumenta a 1,5 cm/píxel.

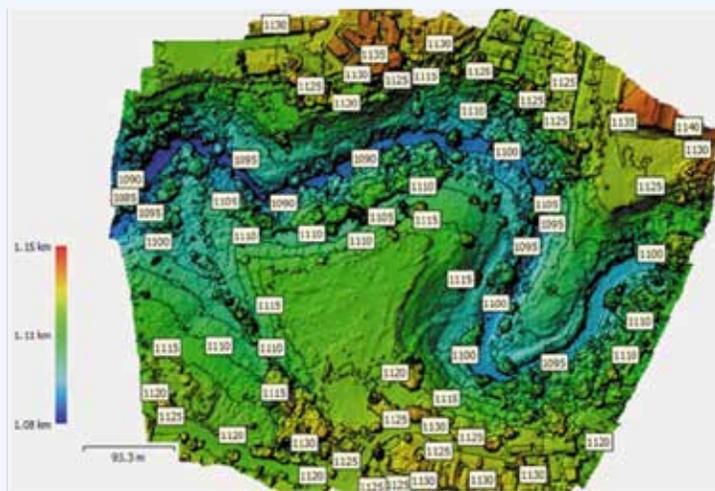
Estos resultados son una muestra del alto potencial que tienen estas técnicas para muy diversas aplicaciones en el campo científico. El Laboratorio de Fotogrametría del TEC actualmente participa en un proyecto donde se está aplicando fotogrametría para cuantificación de la erosión hídrica en parcelas agrícolas y se exploran otros campos de aplicación como agricultura de precisión e inspección de terrenos y estructuras. ■



(a)



(b)

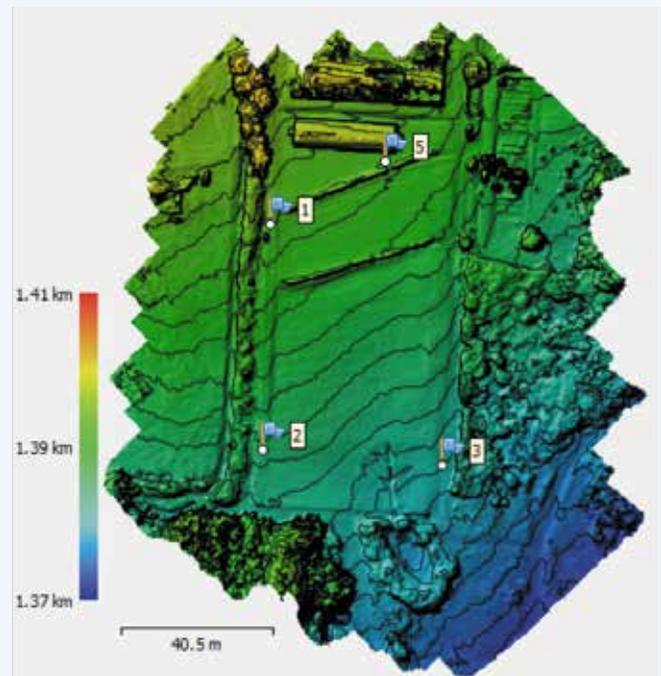


(c)

Figura 4. Productos fotogramétricos realizados en el Laboratorio de Fotogrametría del TEC: (a) modelo tridimensional de un segmento del cañón del río María Aguilar, creado con base en la nube de puntos densa a partir de un levantamiento fotogramétrico; (b) ortomosaico; y (c) modelo de elevación digital de la zona bajo estudio.



(a)



(b)

Figura 5. Productos fotogramétricos utilizando puntos de control en tierra: (a) nube de puntos renderizada; y (b) modelo de elevación digital obtenido en una parcela agrícola experimental. Se muestran los puntos de control para una resolución final aproximada de 1,5 cm/píxel.

Referencias

- [1] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). The Imaging and Geospatial Information Society, <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>
- [2] G. Konecny, Geoinformation, Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems, 2 Ed., CRC Press, 2014.
- [3] U.S. Geological Survey, Landsat Missions. <https://landsat.usgs.gov/>
- [4] Digital Globe, World View Satellites: World View 4. <http://worldview4.digitalglobe.com>
- [5] R. Austin, "Unmanned Aircraft Systems, UAVS Design, Development and Deployment", Wiley Aerospace Series, 2010.
- [6] MIT Technology Review, 10 Breakthrough Technologies 2014: "Agricultural Drones", May-June, 2014. <https://www.technologyreview.com/s/526491/agricultural-drones/>
- [7] Pixhawk Project. <https://pixhawk.org/>
- [8] Paparazzi UAV. http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page
- [9] Agisoft Photoscan. <http://www.agisoft.com/>

¹Profesores y ²estudiante, Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica.