

Enoc Sanz Ablanedo

Profesor Titular de Universidad
Departamento de Tecnología Minera, Topográfica y Estructuras
Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal

FOTOGRAMETRÍA SfM-MVS CON DRONES

**Lección Inaugural del Curso Académico
2023-2024
Campus de Ponferrada**



**universidad
de león**

ENOC SANZ ABLANEDO

Profesor Titular de la Universidad de León

Departamento de Tecnología Minera, Topográfica y Estructuras

Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas

FOTOGRAMETRÍA SfM-MVS CON DRONES



ENOC SANZ ABLANEDO

Profesor Titular de la Universidad de León

Departamento de Tecnología Minera, Topográfica y Estructuras

Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas

FOTOGRAMETRÍA SfM-MVS CON DRONES

LECCIÓN INAUGURAL
CURSO ACADÉMICO
2023-2024
CAMPUS DE PONFERRADA



universidad
de león



© Universidad de León
Servicio de Publicaciones
© Enoc Sanz Ablanedo

ISBN: 978-84-19682-15-4
Depósito legal: DL LE 284-2023

Diseño y maquetación digitales: Juan Luis Hernansanz Rubio
Fotografía de portadilla interior: *Gran Corta de Fabero* (Enoc Sanz Ablanedo, 2015)
Imprime: Gráficas CELARAYN
Impreso en España / *Printed in Spain*
León, Septiembre 2023

CONTENIDO

1. Fotogrametría, un arte, una ciencia y una técnica.....	15
1.1. Concepto y definición.....	15
1.2. Clasificación de la fotogrametría	16
1.3. Relación de la fotogrametría con otras ciencias.....	17
1.3.1. Fotogrametría vs Fotointerpretación	18
1.4. La fotografía; eje central en la fotogrametría	18
1.4.1. Las fotografías son una proyección de la realidad	19
1.5. Historia de la fotogrametría	20
2. Drones; una herramienta moderna para hacer fotogrametría.....	23
2.1. Introducción.....	23
2.1.1. Breve historia de los drones no militares	24
2.2. Tipos de drones	25
2.3. Prestaciones fotogramétricas.....	26
3. Flujo del trabajo fotogramétrico con drones	29
3.1. Legislación vigente sobre el uso de drones.....	29
3.1.1. Obligatoriedad del registro como operador	30
3.1.2. Obligatoriedad de seguro de responsabilidad civil.....	30
3.1.3. Formación del piloto	32

3.1.4. Tipos de espacio aéreo	32
3.1.5. Restricciones durante el vuelo	34
3.2. Trabajos de campo	34
3.2.1. Apoyo en campo	34
3.2.2. Diseño del vuelo fotogramétrico	35
3.2.3. Ajustes de la toma fotográfica.....	37
4. Reconstrucción 3D mediante técnicas SfM-MVS.....	39
4.1. Breve historia de la reconstrucción 3D desde imágenes	39
4.2. Principios de funcionamiento de las técnicas SfM-MVS.....	41
4.3. Alineación de cámaras	41
4.3.1. Remuestreo de imágenes.....	42
4.3.2. <i>Image matching</i>	43
4.3.3. Estimación de los parámetros de orientación interna y exterior.....	51
4.3.4. Ajuste en bloque	55
4.4. Georreferenciación del bloque fotogramétrico.....	56
4.4.1. Medición de los puntos en las fotos.....	58
4.5. Generación de la nube densa de puntos.....	59
4.5.1. Algoritmo <i>Patch.Match</i>	60
5. Productos fotogramétricos derivados	63
5.1. Nube densa clasificada.....	63
5.2. Modelos digitales de elevaciones tipo celda o ráster.....	64
5.3. Modelos digitales tipo curvas de nivel o isohipsas.....	66
5.5. Superficies de triángulos o mallas	68
5.6. Ortofotos.....	69

6. Precisión y exactitud geométrica de la reconstrucción SfM-MVS y de sus productos	71
7. Aplicaciones fotogramétricas con drones	75
7.1. Usos comerciales actuales.....	75
7.1.1. Movimiento de tierras y minería.....	75
7.1.2. Urbanismo y catastro	75
7.1.3. Digitalización del patrimonio	76
7.2. Posibles futuras aplicaciones comerciales pendientes de consolidación	76
7.2.1. Agricultura de precisión.....	76
7.2.2. Periciales en tráfico.....	77
7.3. Líneas de investigación en nuevas aplicaciones de fotogrametría SfM-MVS con drones	77
8. Bibliografía	81

PRÓLOGO

En primer lugar, quiero manifestar mi agradecimiento a la Vicerrectora del Campus de Ponferrada por invitarme a impartir esta lección inaugural. Para cualquier profesor universitario es un hito importante pero también un honor y un privilegio.

Hace ya más de 17 años que inicié mi labor en la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas, aquí en el Campus de Ponferrada. Primero como ayudante. Después como profesor ayudante doctor, como profesor contratado doctor y ya por fin como titular de universidad. Si..., ha sido un largo camino que a veces se ha puesto cuesta arriba, otras fácil, a veces empedrado, otras con curvas... Pero ha merecido la pena porque para mí, enseñar/aprender, investigar/estudiar son de las cosas más gratificantes que se pueden hacer en la vida.

Ahora que me toca escribir este texto, es un buen momento para acordarme de todas las personas que me han ayudado en estos años. No procede hacer ahora un listado con todos los que me pasan por la mente, pero no quiero dejar pasar la oportunidad de reconocer el apoyo de dos personas especiales; mi mujer y mejor apoyo Mónica y mi siempre generoso compañero José Ramón. Sin la ayuda de ambos hoy no estaría preparando esta lección inaugural.

Y como no, dedico el libro a Lucas, Inés y Jimena.

Sr. Rector Magnífico

Sra. Vicerrectora del Campus de Ponferrada

Autoridades

Miembros de la Comunidad Universitaria

Señoras y Señores

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Concepto y definición

Desde un punto de vista etimológico, la palabra “Fotogrametría” contiene tres raíces griegas: “Photos = Luz” “Gamma = Escritura o dibujo” y “Metron = Medida”. Intentando hacer una transcripción literal podríamos acuñar la siguiente definición: “La medida de lo que escribe o dibuja la Luz”. Si bien esta definición no es demasiado explicativa sí que nos introduce dos aspectos importantes, medida y fotografía (= escrito o dibujado con la luz) que van a ser elementos clave en cualquier otra definición de fotogrametría.

Una definición más completa, académica y actual, propuesta por la ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) y mundialmente utilizada, es la siguiente:

“Photogrammetry is the art, science and technology of obtaining reliable three-dimensional information about physical objects and the environment through processes of recording, measuring, and interpreting photographic images and patterns of electromagnetic radiant energy and other phenomena”.

En esencia, como primera aproximación podemos definir a la **fotogrametría** como el conjunto de técnicas que permiten obtener coordenadas tridimensionales de un objeto a partir de la información bidimensional extraída de una o varias fotografías.

1.2. Clasificación de la fotogrametría

Aunque los principios geométricos son siempre los mismos, en fotogrametría se han distinguido tradicionalmente varios tipos de fotogrametría, en los que cambia, fundamentalmente, el tipo de fotografía que se utiliza. Así pues, se habla de **fotogrametría aérea** o **cartográfica** cuando las fotografías se han tomado desde cámaras ubicadas en dispositivos aéreos, alejados del suelo. El hecho de alejarse del suelo no es baladí; basta mirar al horizonte para darse cuenta de dos inconvenientes de la fotografía que se hace a ras del suelo. En primer lugar, los objetos cercanos nos tapan lo que está detrás. En segundo lugar, los objetos que están alejados se ven muchos más pequeños, es decir, se ven a otra escala muy diferente a la de los objetos cercanos. Estos inconvenientes se minimizan cuando nos elevamos sobre el terreno y fotografiamos perpendicularmente al mismo, lo que se llama fotografía cenital: se reducen muchísimo las zonas de sombras y además todo lo que aparece tiene una escala similar.

Sin embargo, el invento de la fotogrametría es anterior al desarrollo de la aviación y, en general de la posibilidad de poner una cámara fotográfica en un objeto volador. Por ello, al principio de la utilización de la fotogrametría con fines cartográficos, se hablaba de **fotogrametría terrestre**, en la que, como su propio nombre indica, se sacaban las fotografías desde el suelo. Este tipo de fotogrametría cartográfica, dadas las ventajas de la fotogrametría aérea, se considera que está hoy en día obsoleta.

Cuando el objetivo de la fotogrametría no es la cartografía terrestre sino el levantamiento de coordenadas de cualquier otro objeto tales como edificios, animales, estructuras, esculturas, etc., se suele hablar de **fotogrametría de objeto cercano** (*close-range photogrammetry* en inglés).

En el caso de **fotogrametría con drones** el uso o finalidad de esta puede ser tanto cartográfica, a pequeña escala, como orientada a objetos de tamaño medio o grande. Dado el pequeño número de años que este tipo de tecnología lleva funcionando no tiene un nombre específico que sea ampliamente utilizado.

1.3. Relación de la fotogrametría con otras ciencias

La Fotogrametría es una disciplina que, de forma tradicional se ha utilizado de forma intensiva para medir o cartografiar la Tierra. Junto con la topografía, la geodesia, la cartografía y la teledetección forma lo que hoy entendemos como geomática. Si bien la fotogrametría cartográfica comparte objetivos con estas otras disciplinas, - particularmente con la topografía-, la fotogrametría es mucho más eficiente en la cartografía de superficies grandes mientras que la topografía lo es en superficies menores.

Desde un punto de vista operacional, podemos considerar la fotogrametría cartográfica como anterior a la cartografía (Figura 1). Así pues, la fotogrametría proporciona unos materiales base o materiales crudos (modelos digitales, ortofotos, etc.) para la posterior generación de planos y mapas mediante técnicas y métodos cartográficos. La digitalización de planos y mapas y su implementación en ordenadores y dispositivos móviles mediante la geoinformática completaría el flujo de información hasta llegar a aplicaciones de uso común por toda la sociedad.



Figura 1. Fotogrametría dentro del flujo de trabajo cartográfico

1.3.1. Fotogrametría vs Fotointerpretación

No se debe confundir la fotogrametría con la fotointerpretación; si bien es cierto que ambas disciplinas comparten la fotografía como fuente de información, la finalidad de una y otra es diferente; mientras que la fotogrametría persigue la medición geométrica precisa, la fotointerpretación busca la descripción cualitativa de elementos presentes en la fotografía como estructuras geológicas o geomorfológicas.

1.4. La fotografía; eje central en la fotogrametría

Como se ha visto en la definición de fotogrametría, la fotografía es una parte esencial de la misma. Cualquier fotografía, incluida la que se hace con cualquier móvil, tiene las siguientes características:

- Una fotografía es una **representación completa de la realidad**; En la fotografía aparece todo lo que es visible. En contra, en un plano o mapa, todo está simplificado mediante símbolos y claves. Si que es cierto que solo aparece lo que está en primer plano; lo que está en segundos o terceros planos no aparece, es decir, hay zonas muertas.
- Una fotografía es una **representación objetiva de la realidad**; la fotografía va a representar la realidad independientemente de los gustos del observador. En contra, una pintura o dibujo va a tener un componente subjetivo muy fuerte.
- El **tiempo que dura el registro** de una fotografía es brevísimo; literalmente pueden capturarse millones de puntos en centésimas o incluso en milésimas de segundo; puede por lo tanto considerarse el registro cuasi **instantáneo**. Esta característica única de la fotografía le permite capturar información de objetos en movimiento o incluso cuando es el observador el que se está moviendo. También esta cualidad de la fotografía le permite “congelar” la forma de objetos que cambian de forma.

- El **registro** fotográfico se hace **a distancia**, sin necesidad de contacto. Por lo tanto, ni hace falta acceso al objeto ni tampoco se le perturba. Las mediciones se hacen a posteriori una vez acabado el registro.
- **Facilidad de registro, conservación y manejo.** Hoy en día, gracias a los grandes avances en fotografía digital, el problema de sacar una foto es algo trivial al alcance de cualquiera; lo mismo sucede en lo referente a la conservación y manejo de este tipo de información. Por pocos euros es posible salvaguardar cientos de miles de fotografías.

Por todo ello, las fotografías, tan al alcance de todos nosotros, tan comunes y tal vez por eso algo infravaloradas hoy en día, pueden considerarse como una increíble fuente de información; eso sí, información en bruto. Y no es suficiente tener mucha información para sacar datos geométricos valiosos de fotografías, sino que es imprescindible aplicar conocimientos y habilidades específicos que comienzan con unas buenas tomas fotográficas, lo cual también requiere arte, gusto y creatividad.

1.4.1. Las fotografías son una proyección de la realidad

Para entender los principios geométricos de la fotogrametría es importante tener claro que una fotografía es una proyección. Aunque realidad y fotografía se parezcan, en el transcurso de una **proyección** no sólo se pierden elementos pertenecientes a la realidad como el tiempo, la temperatura, el movimiento, etc., sino que también se pierde una gran parte de la geometría; la profundidad (Figura 2). Es decir, al hacer la foto vamos a pasar de una rica realidad en 3D a una simple representación plana de la realidad que solo tienen dos dimensiones. Aunque todos los puntos (visibles) de la realidad tienen su contraparte en la fotografía, no vamos a tener en la foto ninguna información de si los puntos están a mayor o menor distancia. Esta información se ha

perdido durante la proyección... Con fotogrametría seremos capaces de recuperar parte de esta información.

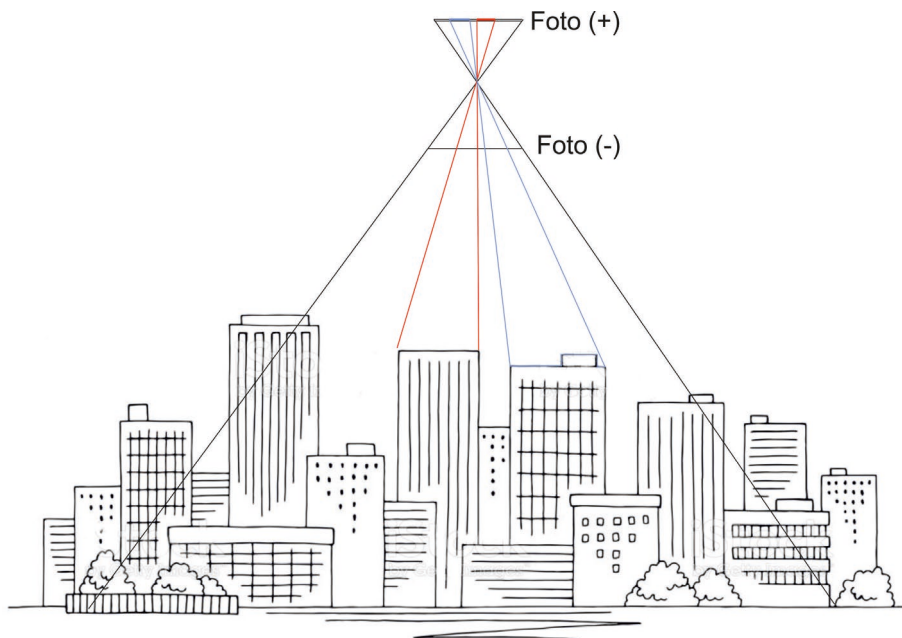


Figura 2. Una fotografía es una proyección de la realidad en la que, a pesar de que cada punto real tiene su contraparte en la fotografía, se pierde la información de profundidad

1.5. Historia de la fotogrametría

Los desarrollos que han conducido a la ciencia actual de la fotogrametría, tal y como la conocemos hoy en día, comenzaron mucho antes incluso que la invención de la fotografía. Por ejemplo, ya en el año 350 a.C. Aristóteles estudió el proceso de la **proyección óptica de imágenes**. Mucho más tarde, a principios del siglo XVIII, Brook Taylor publicó un tratado sobre perspectiva lineal y poco después, J. H. Lambert sugirió que estos principios de la perspectiva podrían usarse para cartografiar la superficie terrestre.

Sin embargo, no es hasta el invento de la fotografía cuando puede efectivamente hablarse de fotogrametría. Así pues, en 1827, el francés

Joseph Niepce, inventa la **heliografía** en la que una sustancia parecida al alquitrán se endurecía gradualmente con la exposición a la luz. Ampliando este trabajo, el también francés Louis Daguerre anunció un **procedimiento fotográfico directo**, en el que la exposición se hacía sobre placas de metal sensibilizadas a la luz con una capa de yoduro de plata. Éste es, esencialmente el proceso fotográfico que ha perdurado hasta el reciente pleno desarrollo de la fotografía digital de nuestros días.

Los primeros experimentos reales en el uso de fotogrametría para cartografía terrestre se realizaron en 1849 bajo la dirección del militar Aimé Laussedat, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Francés. En ellos, Aimé probó cometas y globos para tomar fotografías aéreas. Más tarde, debido a las dificultades encontradas para obtener las fotografías aéreas en el momento y la forma adecuados, abandonó esta línea de investigación y concentró sus esfuerzos en la cartografía con fotografías terrestres. En 1859, el coronel Laussedat presentó un relato de sus éxitos en la cartografía utilizando fotografías. Su trabajo pionero y su dedicación a este tema le valieron el título de "*padre de la fotogrametría*".

Entre 1860 y principios del siglo XX son múltiples y notorios nuevos trabajos de fotografía aérea, -no usada con fines fotogramétricos-, con instrumentos globos, cometas y dirigibles. Pero sin duda, el invento que proporcionó el gran impulso a la fotogrametría fue la invención por los hermanos Wright, en 1903, del **avión**. El avión se utilizó por primera vez en 1913 para obtener fotografías con fines cartográficos.

Durante el período entre la Primera Guerra Mundial y la Segunda Guerra Mundial, la fotogrametría aérea para cartografía progresó hasta llegar a ser una auténtica industria de producción masiva de cartografía. Es precisamente en la segunda guerra mundial cuando de la necesidad de la producción rápida de cartográfica surgen innumerables desarrollos e innovaciones en instrumentos y técnicas. Fina-

lizada la guerra, los desarrollos continuaron a un ritmo muy rápido. Durante el resto del siglo XX la fotogrametría se hizo un método cada vez más preciso y eficiente en el que primero la electrónica y después la informática tendrían cada vez más peso.

En lo que llevamos de siglo XXI, la evolución de la fotogrametría ha continuado. El proceso de digitalización de todo el equipamiento y toda la metodología se ha completado y además se han introducido numerosas novedosas técnicas de procesado automático.

2. DRONES; UNA HERRAMIENTA MODERNA PARA HACER FOTOGRAMETRÍA

2.1. Introducción

Dron o drones es un término coloquial con el que todo el mundo identifica rápidamente un dispositivo volador que no necesita piloto. De hecho, este término se recoge en el diccionario de la RAE con acepción de aeronave no tripulada. Esta idea de “no tripulada” no necesariamente se corresponda con la realidad, ya que a veces, por ejemplo, el dron está pilotado de forma remota. Por ello, existen otras denominaciones o términos más científicos o legales para estos equipos tales como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), UAS (*Unmanned Aerial Systems*). En este documento, para facilitar la lectura, se ha optado por usar la palabra dron.

Los drones han supuesto una revolución en cuanto a fotogrametría aérea porque han posibilitado que cualquier técnico tenga a su disposición una herramienta de fotogrametría aérea efectiva y simple a un coste ridículo. Antes de la aparición de los drones, las alternativas para hacer fotogrametría aérea eran complejas. Contratar un avión especializado o un helicóptero era caro y difícil de cuadrar en el calendario; sólo compensaba en grandes proyectos. Volar un helicóptero de radiocontrol con aspas de 1 m de longitud era difícil y extremadamente peligroso. Volar con un ultraligero contratado era y sigue siendo ilegal; no está permitido. Volar con un globo aerostático era caro, complejo y poco efectivo dada la dificultad del control de su posición. En resu-

men, no había alternativas sencillas para el levantamiento cartográfico de extensiones medianas o grandes o para el levantamiento de objetos de acceso complejo, tales como cubiertas de edificios.

2.1.1. Breve historia de drones no militares

Se puede decir que los primeros drones no militares, útiles para fotogrametría, comenzaron a aparecer a partir del año 2010. Entre 2010 y 2014, apenas existían drones comerciales y aquellos que se utilizaban estaban “fabricados” bajo la filosofía “*Do It Yourself*” o “DIY”. Es una época de gran difusión de proyectos open source basados en Arduino tales como ArduPilot o Arduplane. Entre 2014 y 2016 empiezan a salir al mercado algunos modelos comerciales específicos para fotogrametría de un coste muy alto como el avión de ala fija Bramor y otros no especializados como los 3DR Iris+ o Solo o los DJI Phantom 2 y 3 más bien pensados para vídeo e imagen, pero utilizables en fotogrametría con algunas modificaciones o procedimientos especiales. En estos años los modelos comerciales conviven con los modelos DIY que en los que se montan cámaras fotográficas de calidad.

En el año 2016, la empresa china DJI lanza el modelo Phantom IV Pro, que por primera vez incorpora una cámara con un obturador mecánico. Las prestaciones de este equipo y la cámara que incorpora se convierten en la herramienta estándar en fotogrametría hasta casi la actualidad, y como es lógico acaba con las producciones DIY así como también con otros modelos comerciales de alto precio.

Actualmente, en 2023, en fotogrametría, aunque se sigue utilizando el modelo Phantom IV Pro, cada vez es más habitual el uso de otros modelos más especializados como el DJI Matrice 350 o los de la serie Mavic 3. La tendencia actual y para los próximos años en drones para fotogrametría será seguramente la de integrar sensores de infrarrojos o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) junto a la cámara RGB en un

único dron especializado. Un buen ejemplo muy reciente es el DJI Mavic 3M.

2.2. Tipos de drones

Se distinguen dos tipos básicos de drones en función de que las superficies de sustentación de estos sean fijas o se muevan (Tabla 1). Los drones con alas fijas suelen recordar a los aviones; normalmente tienen 2 alas grandes fijadas a la estructura principal de la aeronave. El impulso o empuje del avión se realiza mediante 1 o 2 motores que mueven hélices de dos o tres palas.



		
Maniobrabilidad	✓	✗
Precio	✓	✗
Tamaño / portabilidad	✓	✗
Facilidad de uso	✓	✗
Alcance	✓	✓
Estabilidad	✓	✓
Capacidad de carga	✓	✓
Seguridad frente a operación	✓	✓
Superficie requerida para despegue y aterrizaje	✓	✗

Tabla 1. Comparación entre las dos tecnologías básicas de drones; multirrotores y aviones de alas fijas

Cuando no existen superficies de sustentación fijas, las propias hélices son las que realizan esta labor. A estos drones se les suele denominar multirrotores ya que generalmente presentan un número mínimo de 4 motores con sus correspondientes hélices. Para la realización profesional de fotogrametría los drones tipo multirotor tienen mayores ventajas con respecto a los de tipo avión o ala fija (Tabla 1).

2.3. Prestaciones fotogramétricas

La operativa de los drones que habitualmente se utilizan en fotogrametría está limitada por aspectos legales y aspectos técnicos. Entre los aspectos técnicos cabe destacar dos cuestiones fundamentales: el alcance del radiocontrol con el que se gobierna el dron y sobre todo la duración de la batería, que siempre es menos a lo deseable. Aunque si es cierto que se pueden utilizar varias baterías, el tener que volver a la estación base siempre es una limitación importante a la eficiencia del proceso. Por esta y otras razones, el tamaño del área de interés o la superficie a cartografiar no puede ser tan grande como en los vuelos fotogramétricos convencionales. En la Figura 3 puede verse que la fotogrametría con drones es operativa en la escala de proyecto de ingeniería civil. Puede considerarse que los multirrotores son adecuados para levantamientos pequeños de entre unas pocas hectáreas y para levantamientos medianos de unos cientos de hectáreas. En estos últimos levantamientos fotogramétricos más grandes serán más adecuados los drones tipo avión. Cuando se trata de levantamientos de muy pequeño tamaño generalmente será más operativo levantar unos pocos puntos con una estación total o un receptor GNSS.

La fotogrametría con drones es una tecnología de medición masiva, con productos fotogramétricos generados que pueden llegar a contener cientos de millones de puntos, de facetas o de píxeles. En este sentido, en cuanto a la complejidad que puede llegar a recogerse de una escena, la fotogrametría SfM-MVS tendría una capacidad equiparable al láser escáner terrestre o el LiDAR aéreo (Figura 3). En cuanto a tamaño de la escena, quedaría entre ambos; capaz de medir eficazmente más superficie que el láser terrestre pero menos que el LiDAR aéreo.

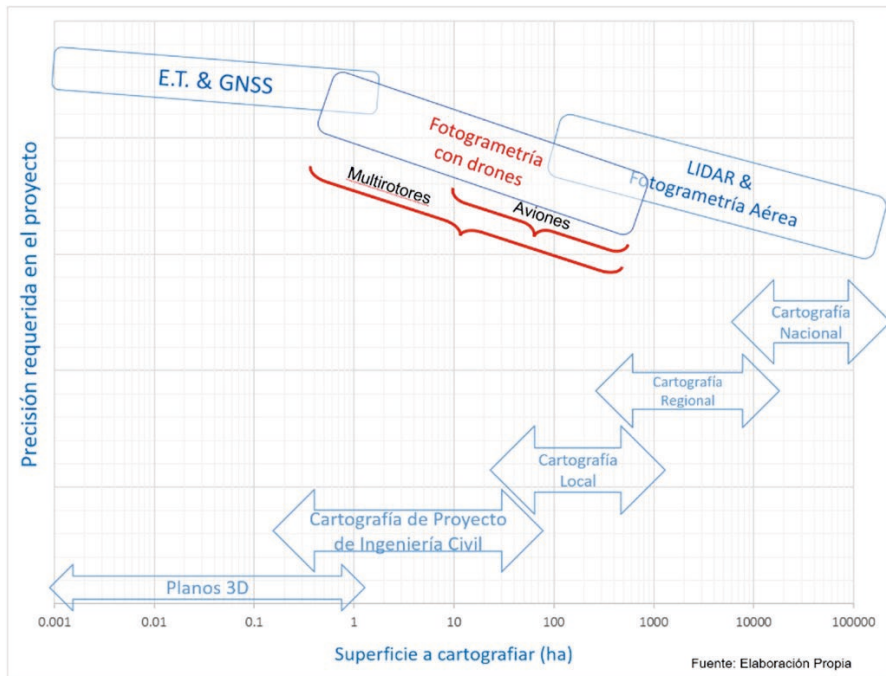


Figura 3. Ámbito de la fotogrametría con drones en función de la superficie a cartografiar y la precisión requerida en el proyecto

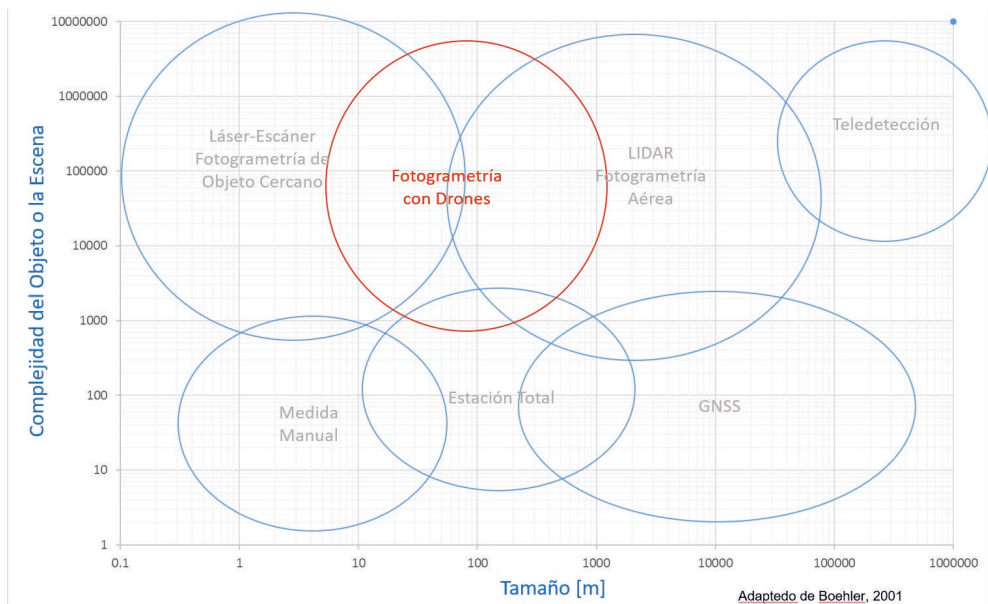


Figura 4. Métodos cartográficos según la superficie a cartografiar y la complejidad de la escena

3. FLUJO DEL TRABAJO FOTOGRAMÉTRICO CON DRONES

El trabajo fotogramétrico con drones tiene varias partes bien diferenciadas; estudios y análisis previos de la zona de interés, trabajo de campo y trabajo en gabinete. Lo primero que hay que hacer por lo tanto, es definir los objetivos del trabajo a realizar, esto es, tener claro los productos fotogramétricos que hay que obtener, así como las características de estos productos en cuanto a resolución, calidad geométrica y calidad radiométrica. Por supuesto, también hay que delimitar claramente la zona de interés, para a continuación analizar el contexto legal de los trabajos aéreos.

3.1. Legislación vigente sobre el uso de drones

Desde el 1 de enero de 2021 es de aplicación en España la normativa europea de UAS recogida en el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 consolidado y en el Reglamento Delegado (UE) 2019/945 consolidado, complementados con el Real Decreto 310/2022. Estas normas afectan a todos los drones independientemente de su uso o tamaño, es decir, regula la operación de simples juguetes que se pueden comprar por 20€ así como también la operación de drones de toneladas de peso que transporten personas o sustancias peligrosas. Como no puede ser de otra manera, el citado reglamento es complejo, largo y farragoso. Como no es objetivo de este trabajo el analizarlo entero, nos restringiremos a la legislación aplicable al siguiente caso práctico fotogramétrico:

- Un técnico, piloto de drones mayor de 16 años

- Se utilizarán 3 drones diferentes
 - » Un dron DJI Mavic 3E de 915 g de peso
 - » Un DJI mini 3 PRO de 249g de peso
 - » Un DJI Matrix 300 RTK de 3,6kg con una cámara Zenmuse P1 de 0,8kg
- No se volará nunca sobre personas no involucradas en el vuelo

El reglamento europeo utiliza un sistema de clasificación principal de las operaciones a realizar en función del riesgo que tiene la operación. Se establecen 3 categorías principales: abierta, específica y certificada. Considerando las restricciones propuestas en el caso, todas las operaciones que se van a realizar en el mismo van a formar parte de la **categoría abierta**.

3.1.1.Obligatoriedad del registro como operador

En primer lugar y en cualquier caso, el piloto si es autónomo, o su empresa/organismo en cualquier otro caso, deberá registrarse como **operador**. Esto es cierto incluso aunque solamente se volara el DJI Mini 3 PRO, ya que el mismo tiene cámara y no se identifica como juguete, y por lo tanto no se ha fabricado de acuerdo con la normativa de juguetes (Directiva 2009/48/CE).

3.1.2.Obligatoriedad de seguro de responsabilidad civil

La legislación europea anteriormente citada establece en su art. 14 que las operadoras, en el momento que se registren deberán tener una casilla en el que introducir “*un número de póliza de seguro de UAS “si así lo exige la legislación de la Unión o la legislación nacional;”*. Es decir, no hay en la legislación europea ninguna obligación directa, sino que se remite a otra legislación nacional que proceda aplicar.

La AESA (Agencia Española de Seguridad Aérea) informa en su página web (18/04/2023) y esto hay que leerlo teniendo en cuenta que no es normativo, sino informativo:

“Tras la modificación de la Ley de Navegación Aérea, y hasta la entrada en vigor del Real Decreto de UAS que complete el régimen jurídico para la utilización civil de sistemas de aeronaves no tripuladas, será necesario tener contratada una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución de cada vuelo que se realice (tanto fines recreativos como profesionales) de acuerdo con los artículos 11 y 127 de la Ley de Navegación Aérea:*

Los UAS con una MTOM igual o superior a 20Kg con fines profesionales deben ajustarse al Reglamento 785/2004, y; Los UAS profesionales con MTOM igual o inferior a 20Kg y aquellos con fines recreativos se deberán ajustar a lo indicado en el Real Decreto 37/2001, de 19 de enero, por el que se actualiza la cuantía de las indemnizaciones por daños prevista en la Ley de Navegación Aérea. El Reglamento 785/2004 establece una cuantía mínima por daños a terceros en tierra de 750.000 DEG -Derechos Especiales de Giro- (para drones de hasta 500kg) mientras que el Real Decreto 37/2001 la cuantía mínima a cubrir es de 220.000 DEG. “

También informa de la tramitación de una normativa específica para drones civiles.

*“*Proyecto de Real Decreto de UAS actualmente en tramitación que en su borrador remitido a consulta pública eximirá del requisito de seguro obligatorio a los UAS de clase C0 y a aquellos sin marcado de clase con masa máxima al despegue inferior a 250 g operados en subcategoría A1.”*

Es decir, que una vez se apruebe esta legislación podría ocurrir que si sólo se utiliza el DJI Mini 3 Pro no hiciera falta seguro de responsabilidad civil, lo cual está pendiente también de que DJI facilite la *tarjeta de identificación de clase*, que aún no está disponible. En cualquier caso, la utilización de cualquier otro modelo si exigirá tener un seguro de responsabilidad civil.

3.1.3. Formación del piloto

Para usar el DJI Mini 3 PRO solo se requiere haber leído el manual con anterioridad a la operación.

En el caso del DJI Mavic 3E, además del conocimiento del manual del equipo se requiere aprobar un examen teórico online de conocimientos (con prueba de haber asistido a una formación online), una declaración de practicar habitualmente con el equipo, así como el paso de un examen teórico escrito en una entidad reconocida.

En el caso del DJI Matrix 300 RTK, curiosamente los requisitos son menores que en el caso anterior; solo se requiere conocer el manual del equipo y aprobar un examen teórico online de conocimientos (con prueba de haber asistido a una formación online). No se exige una declaración de practicar habitualmente con el equipo ni tampoco el paso de un examen teórico escrito en una entidad reconocida, lo cual, dado el valor de los equipos, se da por hecho.

3.1.4. Tipos de espacio aéreo

Antes de la realización de un vuelo fotogramétrico hay que verificar si el mismo se va a realizar dentro de alguna zona geográfica UAS con limitaciones (Figura 5). Estas zonas geográficas UAS, que se pueden consultar en <https://drones.enaire.es/> están definidas por la autoridad competente para controlar riesgos relacionados con la seguridad pública, protección de datos personales, privacidad o medio ambiente. En función de los riesgos, estas zonas geográficas UAS pueden tener restricciones como la prohibición de algunas o todas las operaciones, el requerimiento de condiciones particulares o de una autorización, la de permitir el acceso solamente a ciertas clases de UAS, el de someter las operaciones a normas ambientales específicas, permitir el acceso a UAS equipados con determinados elementos o el requerir que los UAS estén equipados con ciertas funcionalidades (identificación remota,

geoconsciencia, etc.). Finalmente, sobre la base de una evaluación del riesgo la autoridad competente puede haber creado excepciones de uno o más de los requisitos para operar en categoría «abierta».

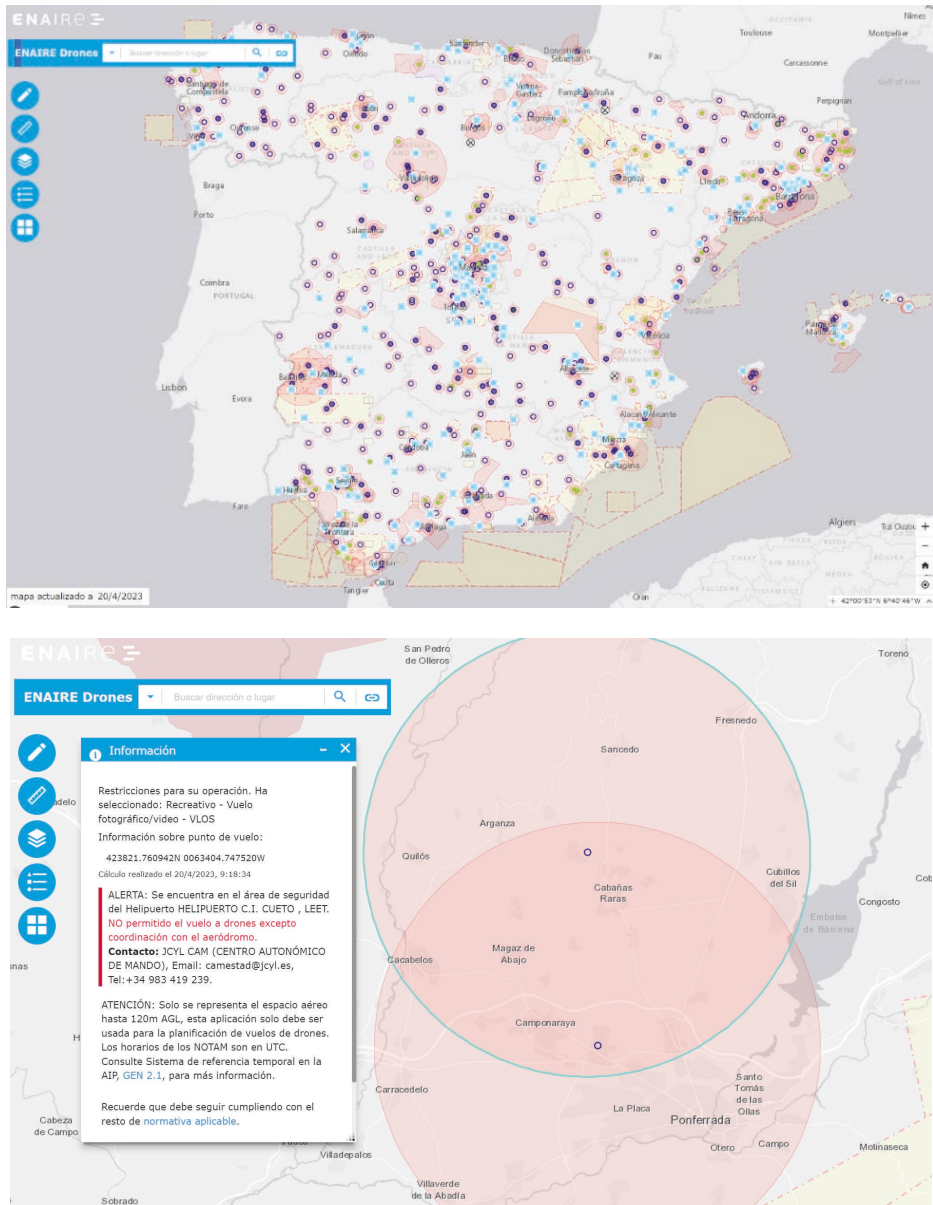


Figura 5. Zonas geográficas UAS a 20/04/2023 y ejemplo de restricciones en torno a Ponferrada.

3.1.5. Restricciones durante el vuelo

Con la legislación vigente, con el dron DJI Mini es posible volar sobre personas no involucradas en el vuelo, aunque según dice el reglamento, hay que tratar de evitarlo. Lo que no permite es volar sobre aglomeraciones de personas.

Con los otros dos drones del caso práctico, el DJI Mavic 3E y el DJI Matrix 300 RTK con cámara Zenmuse P1 no se permite volar sobre personas ajenas al vuelo. En el caso del DJI Mavic 3E hay que guardar una distancia horizontal mínima de 30 m o de 5 m si se utiliza una baja velocidad. En el caso del DJI Matrix 350 con la cámara Zenmuse P1, al superarse los 4 kg de peso, no se puede volar sobre nadie y además hay que alejarse 150 m de núcleos urbanos. En cualquier caso, no se pueden rebasar los 120m de altura.

3.2. Trabajos de campo

A la hora de hacer un vuelo fotogramétrico conviene situar la estación de control en una zona tranquila y a poder ser, que sea el punto más alto de la zona a volar. Es importante que la zona esté despejada de árboles y otros obstáculos para tener buena visibilidad del dron durante todo el vuelo.

3.2.1. Apoyo en campo

La georreferenciación de un proyecto es el conjunto de operaciones destinadas a dotar el proyecto y sus productos de un sistema de referencia o de coordenadas específico. Una de las distintas formas de georreferenciar un proyecto fotogramétrico es la utilización de puntos de apoyo en suelo "*Ground Control Points*" o GCPs. Estos puntos son elementos reconocibles en las fotografías de los que también se conocen sus coordenadas precisas. Los puntos de apoyo pueden ser elementos del paisaje (piedras, matas, esquinas, postes) que se pueden

identificar después del vuelo o elementos ajenos al terreno puestos “ad hoc” que necesariamente han de situarse antes del vuelo. Es lo que se denomina preseñalización. Normalmente la preseñalización se materializa mediante cruces o círculos pintadas en el suelo o mediante la colocación de dianas cuadradas o circulares. La preseñalización en general es un método más fiable y rápido y además los puntos se pueden situar a discreción.

Los puntos de control deben estar situados homogéneamente distribuidos por toda la zona de interés, idealmente en distribución triangular tipo diamante, alejados de taludes u otros salientes u obstáculos que puedan dificultar su observación en las fotografías. Deben tener buen contraste con el suelo, así como un tamaño adecuado a la escala de vuelo.

3.2.2. Diseño del vuelo fotogramétrico

El diseño del vuelo fotogramétrico consiste en elegir los parámetros y variables de vuelo adecuados para conseguir los objetivos inicialmente planteados. El parámetro más importante es la **altura de vuelo**. Ésta ha de elegirse primordialmente en función de la resolución que se necesite obtener en los diferentes productos fotogramétricos. A mayor resolución geométrica requerida más baja será la altura del vuelo, mayor será la duración del mismo y mayor número de fotos se tendrán que procesar. En la resolución geométrica de las fotos también influyen las características de la cámara fotográfica, aunque como es lógico, esto no es un parámetro a elegir sino una constante para cada cámara concreta.

Los siguientes parámetros de vuelo a elegir de mayor importancia son los **solapes transversales y longitudinales**, es decir, el grado de zonas comunes en dos fotografías adyacentes. En general, mayores grados de solape proporcionan mejores resultados, a coste de incrementar el número de imágenes a procesar. El porcentaje de solape

transversal también influirá de forma muy importante en la duración del vuelo; en la fotogrametría tradicional, en la que se utilizaban películas físicas y el procesado de las imágenes era en parte manual, se estimaba como óptimo un 35% de solape transversal. Hoy en día que las imágenes son digitales y el procesado es casi automático es muy habitual encontrar solapes, tal vez excesivos e injustificados de hasta el 80%. Un solape transversal del 65% debería ser más que suficiente para la mayoría de proyectos. Por su lado, los solapes longitudinales no incrementan los tiempos de vuelo, pero si incrementan el número de fotografías a procesar. Tradicionalmente se consideraban adecuados solapes longitudinales del 60%. Hoy en día es habitual utilizar solapes longitudinales del 80%.

El tercer parámetro para considerar al diseñar un vuelo fotogramétrico es el de la **dirección de las pasadas**. En fotogrametría clásica se recomienda hacer las pasadas en dirección Este-Oeste. Esto permite que las sombras se proyecten en una dirección consistente a lo largo de todas las fotos de la misma pasada. En el caso de realizarse las pasadas Norte-Sur, la relación entre los salientes y sus sombras cambian significativamente entre fotos consecutivas de la misma pasada. Por ejemplo, al ir de norte a sur, un árbol del que se vea su sombra completa en la siguiente foto puede aparecer la sombra tapada por el propio árbol. En fotogrametría SfM-MVS, donde los solapes transversales se utilizan igualmente como los longitudinales para la extracción de puntos estas razones no deberían pesar tanto en la elección de la dirección de las pasadas. Otras consideraciones como reducir la duración del vuelo disminuyendo el número de pasadas deberían tener más prevalencia.

La **posición de la cámara con respecto a las pasadas** es un aspecto importante. Para reducir la duración del vuelo de un proyecto con dron, la dimensión mayor del sensor deberá alinearse transversalmente a la dirección de la pasada. Con ello además se conseguirá una

mayor homogeneidad en las triangulaciones entre las fotos. De menor importancia es la orientación del dron respecto de las pasadas.

Un aspecto fundamental para obtener buenos resultados es conocer si la cámara del dron tiene lo que se conoce como **diafragma mecánico** “mechanical shutter” o “global shutter”. Básicamente se trata de la capacidad de medir la luz en todos los píxeles del sensor en el mismo instante. La mayoría de las cámaras instaladas en drones comerciales orientados a foto o video no tienen esta característica, sino que tienen lo que se conoce como “**rolling shutter**”. En estos sensores, la cantidad de luz que llega a cada píxel se va midiendo primero en un píxel, luego en el siguiente y así sucesivamente, de tal forma que entre las primeras y las últimas medidas puede haber pasado un tiempo significativo, lo que aunque no sea perceptible, acaba deformando las imágenes. Por ello, en las cámaras dotadas de diafragma mecánico, las fotos pueden ser tomadas con el dron en movimiento, mientras que en el resto será necesario que el dron se pare en cada punto en el que se tome una fotografía.

Finalmente podemos citar, como parámetro de diseño, la **sobre distancia** en las pasadas más allá de la zona de interés. Generalmente la zona de interés se señala mediante un polígono, dentro del cual se calculan las pasadas. Dependiendo del proyecto, puede ser interesante tomar fotografías más allá de ese perímetro para contextualizarlo o complementar el área de interés o simplemente para asegurarnos de que todos los puntos dentro del perímetro tienen un nivel de solapamiento alto.

3.2.3. Ajustes de la toma fotográfica

En general, la cámara de fotos siempre se configurará a máxima **resolución**. Como generalmente los sensores tienen forma rectangular con una relación de aspecto entre el lado mayor y el menor de 3:2 será precisamente esta ratio el que se habrá de seleccionar.

En relación con el **tiempo de exposición**, la **apertura de diafragma**, la **sensibilidad ISO** y el **balance de blancos** lo ideal es mantenerlos constantes en todo el vuelo. De esta forma se lograrán ortofotos radiométricamente homogéneas. Evidentemente esto sólo se puede conseguir en un día totalmente despejado o nublado. Para elegir los valores más adecuados es buena práctica hacer una foto previa en modo automático y en una zona representativa de todo el conjunto para a continuación fijar los valores automáticos en la **exposición manual**.

En relación con la calidad de las imágenes siempre se deberá seleccionar un nivel bajo de **compresión JPG**. Opcionalmente, aunque tal vez no sean necesarias posteriormente, también es buena práctica grabar las **imágenes crudas** (RAW).

Para el balance de blancos siempre es buena práctica llevar al campo un **patrón de blanco** y calibrar la cámara con el mismo. Si la cámara no lo permite, es interesante grabar también las imágenes RAW para posteriormente, utilizando una foto del patrón corregir el color de todas las imágenes mediante postproceso.

Si hay un exceso de energía disponible, lo que puede suceder en horas centrales del día y en terrenos claros y muy reflexivos, es buena práctica sobreponer en el objetivo un filtro de oscurecimiento. La calidad de la foto será mejor cuando no se utilizan valores muy extremos (i.e. cortos) en el tiempo de exposición.

4. RECONSTRUCCIÓN 3D MEDIANTE TÉCNICAS SfM-MVS

4.1. Breve historia de la reconstrucción 3D desde imágenes

Los acrónimos SfM y MVS (Structure from Motion y Multi-View Stereo) hacen referencia a una combinación de técnicas fotogramétricas, de procesamiento de imágenes y de visión artificial que permiten reconstruir la geometría en 3D (tres dimensiones) de objetos u escenas con un alto grado de automatismo y a partir de fotografías.

Los primeros desarrollos de estas técnicas se remontan a la década de los años 70 del siglo pasado, cuando los investigadores ya comienzan a explorar la posibilidad de utilizar técnicas fotogramétricas para reconstruir modelos tridimensionales de objetos a partir de fotografías analógicas (Brown, 1971; Granshaw, 1980). En esa época, sin embargo, lo laborioso de trabajar manualmente con fotos analógicas, así como las limitaciones de los ordenadores de la época ralentizan mucho los desarrollos. Más adelante, en la década de los 90, los diferentes avances tecnológicos sobre todo en microinformática posibilitarán a los investigadores la generación de modelos tridimensionales de diversos objetos en numerosos campos como la arqueología, la cartografía o la ingeniería civil (Faugeras and Maybank, 1990; Tomasi and Kanade, 1992). Sin embargo, incluso en aquellos años que parecen tan cercanos, estas técnicas seguían siendo muy laboriosas y requerían mucho tiempo, lo que las hacía poco prácticas para su uso en aplicaciones reales. En 1999 aparece la primera mención al acrónimo SfM (*Structure*

from Motion) (Jebara et al., 1999) como una aproximación a la estimación recursiva del movimiento, estructura y geometría de cámaras en sistemas dinámicos no lineales; es decir a la posibilidad de reconstruir la escena por donde se va moviendo una cámara que va grabando video imágenes. Más tarde surgiría el término complementario Multi-View Stereo (MVS) (Goesele et al., 2006) que, amplía el ámbito de la reconstrucción 3D para el caso de la utilización simultánea de varias cámaras no necesariamente en movimiento. Desde 2012, se ha ido generalizando, cada vez más, el uso común de ambos términos unidos por un guión: SfM-MVS y que hoy ha quedado como el acrónimo que mejor refiere el conjunto de todas las técnicas de reconstrucción 3D.

El mismo año que surge la denominación SfM, 1999, David Lowe publica el algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 1999) que en los años siguientes permitiría un gran avance en el desarrollo de las técnicas SfM-MVS gracias al uso de la denominada correspondencia automática. Este nuevo algoritmo, sus evoluciones y otros similares que se obtendrían después, abrió la posibilidad de procesar gran cantidad de datos de imagen de manera automática; es decir de forma mucho más eficiente y con una mayor precisión.

Desde finales de la década pasada, coincidiendo con la aparición de los drones civiles, hasta nuestros días y paralelamente al incremento de capacidad computacional de los ordenadores, las técnicas SfM-MVS se han ido volviendo todavía más precisas, refinadas y eficientes, lo que ha permitido la creación de modelos tridimensionales cada vez más complejos a partir de imágenes cada vez más grandes y diversas. La combinación de la posibilidad de tomar fotografías aéreas con drones de forma controlada y desde alturas y ángulos hasta el momento imposibles, junto al enorme desarrollo de las técnicas SfM-MVS han convertido la creación de modelos 3D en un proceso eficiente en tiempo y sencillo o amigable (Fonstad et al., 2013) and river science is no exception. Consequently, a wide range of topographic measurement

methods have evolved. Despite the range of available methods, the production of high resolution, high quality digital elevation models (DEMs. La reconstrucción 3D con técnicas SfM-MVS con drones se ha convertido en una herramienta muy útil en muchas áreas de la ciencia tales como la realidad aumentada, la realidad virtual, la cartografía aérea, la arqueología, la agricultura, el medioambiente o la arquitectura.

4.2. Principios de funcionamiento de las técnicas SfM-MVS

Según la mayoría de los estudios y revisiones (Snavely et al., 2008; Fonstad et al., 2013; Nex and Remondino, 2014; Colomina and Molina, 2014; Eltner et al., 2016; Granshaw and Fraser, 2015) el proceso estándar de las técnicas SfM-MVS se puede resumir en tres fases principales: **Alineación de cámaras, georreferenciación y construcción de la nube densa**. A continuación, se pasa a detallar los algoritmos más empleados en los softwares que integran técnicas SfM-MVS. Hay que hacer notar que no todas las aplicaciones utilizan los mismos algoritmos ni en el mismo orden, si bien es cierto que muchas veces los utilizados son pequeñas variaciones u optimizaciones de los aquí presentados. Por otro lado, si bien en las aplicaciones SfM-MVS abiertas (open source) es posible saber con exactitud los algoritmos empleados en las comerciales los fabricantes no aportan detalles pues lo consideran parte secreta de su tecnología.

4.3. Alineación de cámaras

A esta primera fase, además de *alineación de cámaras* se la conoce también como reconstrucción de nube de puntos dispersos. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de visualización del resultado final de esta etapa.

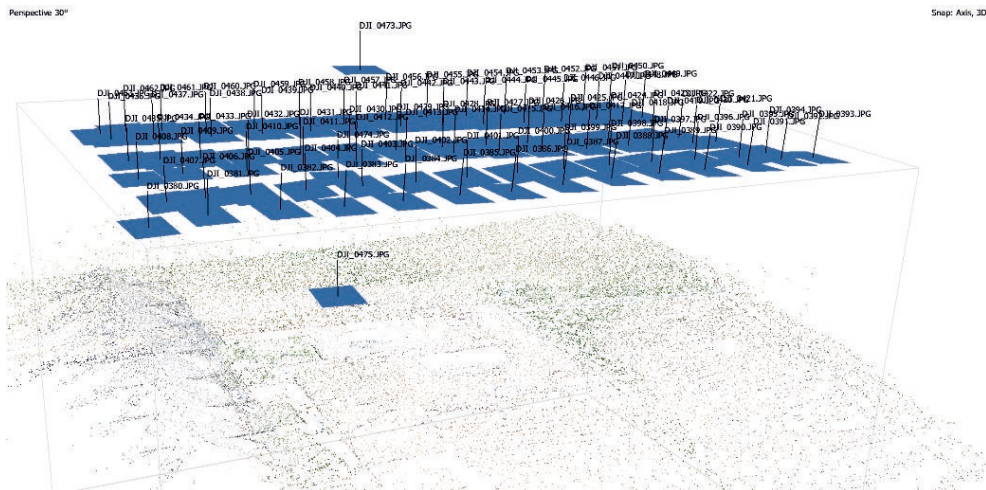


Figura 6. Visualización del resultado de la etapa de alineación de cámaras, donde la nube dispersa comparte con las fotografías (rectángulos azules) un mismo sistema de referencia arbitrario.

En este paso inicialmente solo es necesario tener las fotografías del objeto y una aproximación de la geometría interna de la cámara fotográfica. Las fotografías han de ser nítidas y tener un nivel de exposición adecuado. En general, a mayor calidad del material fotográfico mayor calidad tendrá la reconstrucción 3D. En referencia a la aproximación de la geometría interna de la cámara esta aproximación puede ser tan simple como el conocimiento aproximado de la longitud focal de la cámara, y las dimensiones (alto y ancho) del sensor fotográfico. Generalmente, todas las fabricantes de cámaras fotográficas incorporan esta información básica en los metadatos EXIF de las fotografías. Si bien la longitud focal es un valor aproximado al real, las dimensiones del sensor suelen ser valores muy exactos y cercanos a las dimensiones reales.

4.3.1. Remuestreo de imágenes

La fase de alineación de cámaras suele comenzar con un **remuestreo** a la baja de las imágenes. Generalmente las fotografías tienen una cantidad de píxeles tan grande que, si se utilizaran todos, la fase de ali-

neación de cámaras requeriría una cantidad muy grande de procesamiento informático y por lo tanto de tiempo. Utilizando en esta primera fase imágenes remuestreadas con $1/4$ de los píxeles, un $1/16$ o incluso un $1/64$ el tiempo de procesamiento se reduce en estas mismas proporciones sin apenas merma en la calidad del resultado de la alineación de cámaras. Como ejemplo práctico, a través de este capítulo, utilizaremos una imagen de una cámara Samsung NX500 que originalmente tiene una resolución de 6480×4320 (27.993.600 píxeles). Remuestreándola a la cuarta parte quedará en una imagen de 3240×2160 , es decir, 6.998.400 píxeles o 7 Megapíxeles.

4.3.2. Image Matching

Una vez remuestreadas las imágenes generalmente comienza la ejecución de un algoritmo de extracción de puntos de interés, puntos clave o entidades locales (“*keypoints*”) en todas las imágenes. Uno de los algoritmos más empleados para la extracción de puntos clave en las técnicas SfM-MVS es el **SIFT** (*Scale Invariant Feature Detection*) y fue creado por David Lowe a finales del s. XX. (Lowe, 1999). El método de Lowe consiste en la transformación de cada imagen en una colección grande de vectores (o puntos clave), cada uno con sus coordenadas imagen, su escala, su orientación y sus descriptores, de tal forma, que un punto clave es reconocible en distintas fotografías de una misma escena. Es decir, los puntos clave de una fotografía serán similares a los extraídos en otra fotografía realizada desde más lejos o cerca (inmunidad a cambio de escala), con la cámara rotada (inmunidad a rotaciones), desde otro ángulo (inmunidad a cambios en la perspectiva) o con ligeros cambios en iluminación o color. Los puntos clave comparten propiedades con las neuronas en la corteza visual primaria que codifica formas básicas, color y movimiento para el reconocimiento de objetos en la visión con primates (Serre et al., 2005). Aunque actualmente los distintos softwares puedan utilizar otros algoritmos o variaciones de SIFT, todos comparten una serie de pasos comunes

con SIFT que son los que se describirán a continuación. El método de Lowe tiene 4 fases principales; búsqueda, orientación, y descripción de puntos clave.

4.3.2.1. *Búsqueda de puntos de interés o "Scale-invariant feature detection"*

Para la detección de puntos claves o como también "búsqueda de puntos de interés", "detección de características", "feature detection" o "Scale-invariant feature detection" la imagen es procesada a diferentes escalas -o niveles de remuestreo-, utilizando la función *diferencia de Gaussianas* (Figura 7), que es un algoritmo que trata de imitar el procesado que hace la retina del ojo para extraer detalles que enviar al cerebro (Young, 1987). Después de analizar máximos y mínimos, los puntos candidatos obtenidos que presentan bajo contraste, así como los puntos que parecen estar a lo largo de un borde se descartan. Estos filtros aseguran que los puntos clave sean más fiables para el posterior emparejamiento y el reconocimiento en otras imágenes. Para conseguir puntos clave en toda la imagen de forma homogénea esta se puede subdividir en pequeñas regiones de igual tamaño en las que finalmente se elegirá el candidato con mayor contraste. Por ejemplo, la imagen del ejemplo anterior de 7 Megapíxeles se subdivide en 10.000 zonas de aproximadamente 700 píxeles, pudiéndose obtener un máximo de 10.000 entidades locales, aunque después de los descartes el número puede ser muy inferior. Para obtener unas mejores coordenadas de las entidades locales, opcionalmente se pueden aplicar técnicas subpíxel como las propuestas por Lindeberg y colaboradores (Lindeberg and Bretzner, 2003).

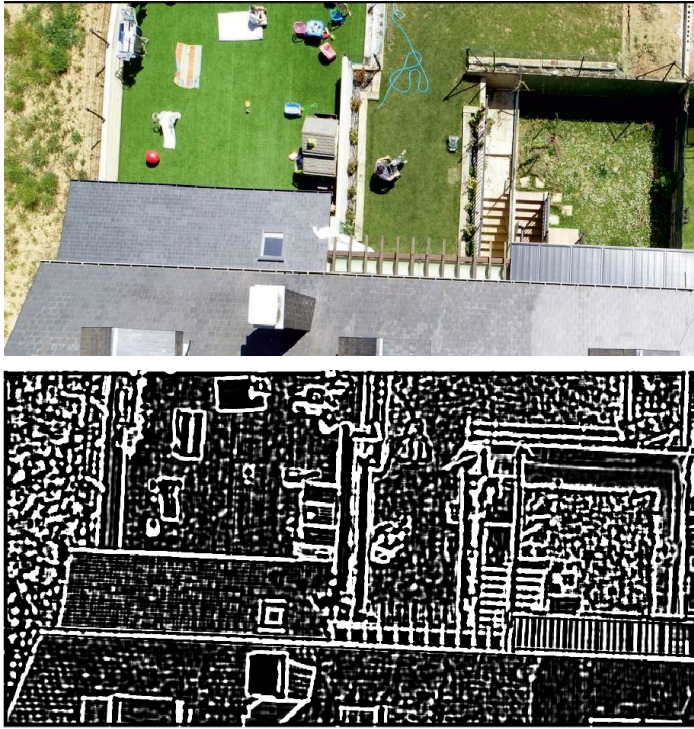


Figura 7. Ejemplo de aplicación de un filtro de diferencia de gaussianas en una foto tomada por un dron.

4.3.2.2. Orientación de los puntos de interés

En este segundo paso del algoritmo SIFT se asigna una orientación principal a cada entidad local para lograr la invarianza o inmunidad respecto a la rotación de las imágenes. Esta inmunidad a los cambios en la rotación se consigue gracias a que cada descriptor de las entidades locales se describirá posteriormente con una orientación relativa a la orientación principal de la misma. Para ello se toman los puntos vecinos en torno a cada punto de interés —teniendo en cuenta la escala— y se calcula la magnitud y dirección del gradiente. A continuación, se hace un histograma de dichas direcciones ponderando con la magnitud del gradiente. El mayor pico en el histograma indica la orientación principal del punto de interés.

4.3.2.3. Descripción de puntos de interés

En los pasos previos se ha visto como se localizan las entidades locales a distintas escalas y como se les asigna una dirección principal que les hace invariantes o inmunes a cambios de escala, rotación y traslación. A continuación, con el objetivo de hacer única y reconocible a cada entidad local se creará, mediante cálculos, un vector con múltiples descriptores que hará que la entidad local además de ser reconocible sea inmune o invariante a cambios de iluminación, cambios en el punto de vista o de perspectiva o cambios en la coloración.

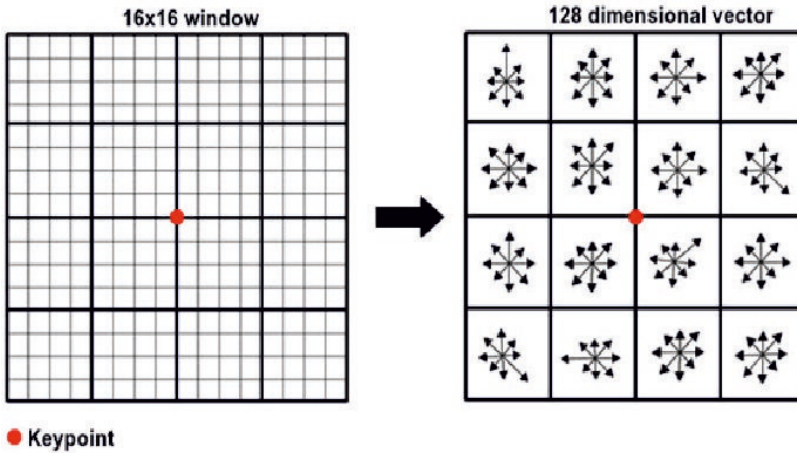


Figura 8. Ejemplo del contexto inmediato en un punto de interés (omitidos los cambios) y sus correspondientes descriptores. Tomado de (["http://vision.stanford.edu/Problem-Set-3-solutions-ver2.pdf"](http://vision.stanford.edu/Problem-Set-3-solutions-ver2.pdf) n.d.)

Para cada punto clave se toman los valores digitales de los 256 (16×16) píxeles vecinos. Estos, a su vez, se subdividen en 16 subconjuntos de tamaño 4×4 y para cada uno de estos subconjuntos se crea un histograma. Las magnitudes y orientaciones del gradiente del correspondiente histograma se ubican respecto de la entidad local, teniendo en cuenta la escala de la entidad local ya así estimar el nivel de desenfoque gaussiano de la imagen. Para lograr la invariancia en la orientación, las coordenadas del descriptor, así como las orientaciones del gradiente se rotan en relación con la orientación principal de la

entidad local. Dado que hay $4 \times 4 = 16$ histogramas, y cada uno tiene 8 parámetros, el conjunto de descriptores tendrá 128 elementos por cada entidad local (Figura 8). El vector con estos descriptores se normaliza a una longitud unitaria para mejorar la invariancia a cambios afines en la iluminación. Adicionalmente, también se puede aplicar umbrales (recortes) y posteriormente nuevas normalizaciones que podrán reducir los efectos de cambios no lineales en la iluminación mejorando los resultados de coincidencia entre la misma entidad local de distintas fotografías.

4.3.2.4. *Emparejamiento o correspondencia de puntos de interés, "Feature Matching"*

Una vez que se ha elaborado una base de datos con los puntos de interés detectados en cada foto, incluyendo su localización (en coordenadas imagen), su orientación y sus descriptores, el siguiente paso es el de **emparejar** los puntos de interés homólogos que están en distintas fotos, es decir, tratar de encontrar los mismos puntos en las distintas fotos. Debido a la gran cantidad de puntos de interés que puede haber por cada foto la combinatoria de posibles cruces entre candidatos es muy grande y utilizando los métodos tradicionales exigiría unos recursos computacionales muy grandes. Por ello Lowe propuso utilizar una modificación de el algoritmo k-d llamado "*best-bin-first search method*" (Beis and Lowe, 1997) que puede identificar los vecinos más próximos con una alta probabilidad usando solo una pequeña cantidad de computación. Lo que hace el algoritmo BBF es usar un orden modificado para el algoritmo k-d tree algorithm de tal forma que las búsquedas se realizan en el orden de su distancia más cercana a la ubicación de la consulta. Este orden de búsqueda requiere el uso de una cola de prioridad basada en almacenamiento dinámico para una determinación eficiente del orden de búsqueda. La mejor coincidencia de candidatos para cada punto clave se encuentra identificando su vecino más cercano en la base de datos de puntos clave. Los vecinos

más cercanos se definen como los puntos clave con una distancia euclidiana mínima desde el vector descriptor dado. La probabilidad de que una coincidencia sea correcta se puede determinar tomando la relación entre la distancia del vecino más cercano y la distancia del segundo más cercano. Utilizar un umbral de 0.80 elimina el 90% de los falsos emparejamientos a la vez que solo se pierden menos del 5% de emparejamientos correctos. Para mejorar todavía más la eficiencia del algoritmo la búsqueda se para después de los primeros 200 primeros candidatos, lo que incrementa la velocidad del procesado dos órdenes de magnitud a la vez que sólo se pierde un 5% de los emparejamientos correctos.

4.3.2.5. *Identificación de clústeres*

Una vez ya se han generado los emparejamientos de puntos de interés entre las distintas fotos comienza una nueva fase que culminará en el filtrado y eliminación de emparejamientos erróneos. El primer paso es la creación de agrupaciones o clústeres de puntos clave que sean coherentes con un determinado modelo, interpretación o hipótesis de la escena en las fotografías. Dicha creación de clústeres se realiza utilizando la Transformada de Hough. Cuando se encuentran muchos puntos de interés que son coherentes con el modelo se considera que esos emparejamientos son probablemente probabilísticamente más correctos que cuando hay emparejamientos aislados. Según se va comprobando la coherencia de los emparejamientos con el modelo se van creando entradas en una tabla con las posiciones, orientaciones y escalas previstas en el modelo a partir de las hipótesis de emparejamientos. Acabada la comprobación se crean contenedores de al menos 3 entradas, y luego se ordenan los contenedores de mayor a menor tamaño.

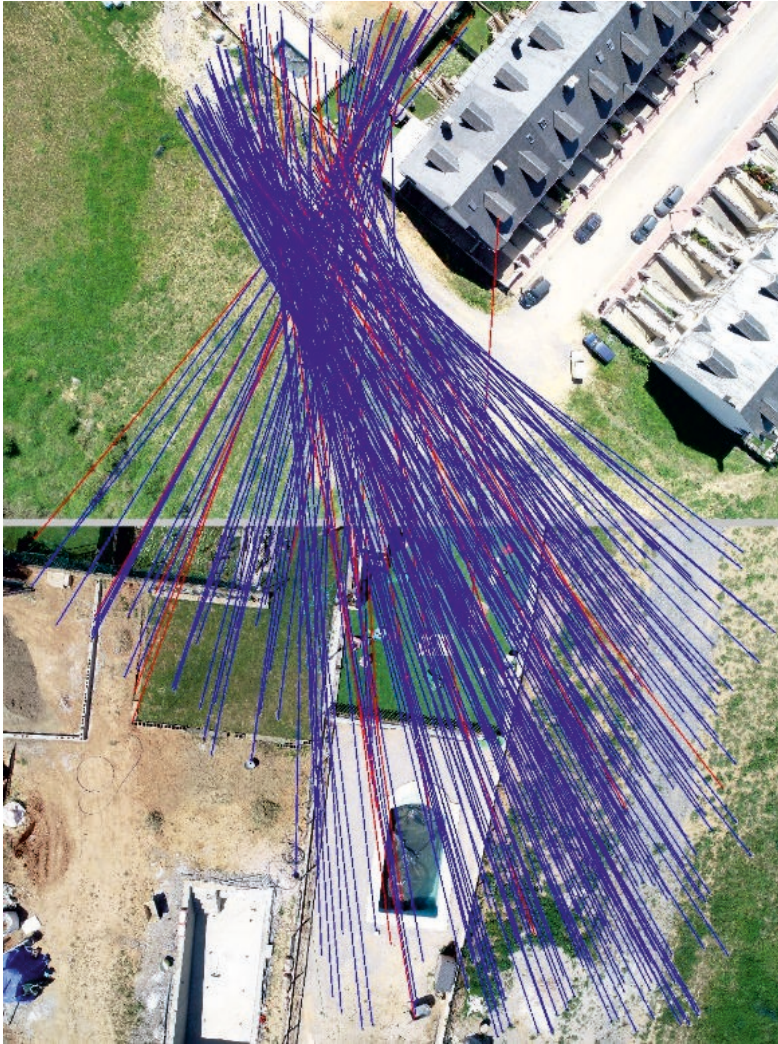


Figura 9. Emparejamiento de puntos clave entre los que se aprecian varios clústeres principales.

Como se ha visto con anterioridad, cada uno de los puntos de interés lleva asociada la ubicación 2D, la escala, la orientación y los descriptores. La forma en que se relacionan estos datos con una interpretación de la escena es mediante una transformación de similitud de 4 parámetros, que es un modelo mucho más simplista y aproximado que la proyección espacial completa de 6 grados de libertad para un

objeto 3D que se realizará en pasos posteriores. Como esta transformación, además de ser simplista y aproximada tampoco tiene en cuenta deformaciones no rígidas, Lowe utilizó rangos de contenedor muy flexibles; de 30 grados para la orientación, un factor de 2 para la escala, y 0,25 veces la dimensión máxima de la imagen proyectada (utilizando la escala prevista) para la ubicación. A los puntos generados a una escala más grande (más cercanos) les dio el doble de peso que a los de escala más pequeña, lo que mejora el rendimiento de reconocimiento al dar más peso a la escala menos ruidosa. Para evitar el problema de los efectos de borde en la asignación de contenedor, cada coincidencia de punto de interés vota por los 2 contenedores más cercanos.

4.3.2.6. *Verificación del modelo y eliminación de puntos atípicos "outliers"*

A continuación, cada clúster identificado es sometido a un procedimiento de verificación en el cual se calcula una solución, por mínimos cuadrados, de los parámetros de la transformación afín que relacionan la posición de los puntos clave en las fotografías y en el modelo (Figura 9).

Calculados los parámetros de transformación, los outliers pueden eliminarse comprobando el acuerdo entre los emparejamientos y el modelo para los parámetros de la solución. Dado el carácter lineal de la solución del ajuste por mínimos cuadrados a cada emparejamiento se le requiere coincidir con una tolerancia de la mitad del rango de error que fue usado para la creación de los contenedores de la transformada de Hough. Como se eliminan outliers, se puede ejecutar nuevamente el ajuste por mínimos cuadrados con los puntos que queden iterándose el proceso. Por otra parte, en una fase posterior se puede añadir alguno de los puntos que previamente se habían descartado por no encajar con soluciones anteriores.



Figura 10. Ejemplo de puntos clave extraídos en una fotografía una vez eliminados los atípicos.

4.3.3. Estimación de los parámetros de orientación interna y exterior.

La etapa de emparejamiento de imágenes finaliza con la obtención de una base de datos de puntos que se han identificado en al menos 2 fotografías. El listado es bastante fiable porque está filtrado a través de una transformación afín. Con estos datos comienza la etapa de la obtención analítica de los **parámetros internos de cámara**, también llamados **parámetros de orientación interior** y los **parámetros de posición y orientación relativa**, también denominados **parámetros de orientación exterior**. Estos parámetros relacionarán, en un sistema de coordenadas tridimensional y coherente, las coordenadas 2D en cada fotografía de todos puntos clave con las coordenadas reales 3D que esos puntos clave tienen en la realidad. El modelo que va a relacionar ambos mundos 2D y 3D va a ser el llamado modelo *Pinhole* o de

perspectiva cónica o central, que es el que mejor imita el proceso físico fotográfico real.

Los parámetros de orientación interna o de cámara, en el modelo pinhole o de perspectiva cónica, son: alto del sensor, ancho del sensor, longitud focal, posición del punto principal y parámetros de distorsión. Dentro de estos últimos suelen considerarse 2 o 3 parámetros para modelizar la distorsión radial y 2-4 parámetros para modelizar la distorsión por descentramiento.

El **alto y el ancho del sensor** siempre son magnitudes inicialmente conocidas pues el fabricante del mismo lógicamente las conoce con precisión. Esta información suele grabarse como metadatos en la información EXIF de las fotografías o en ficheros auxiliares.

La **longitud focal** es una magnitud física que tiene que ver con la cantidad de escena que registra el sensor, es decir, la apertura angular de las lentes. Generalmente, en fotogrametría las longitudes focales tienen unos valores del mismo orden de magnitud que el alto del sensor, lo que equivale a aperturas de 65-70 grados sexagesimales. Si nos fijamos en el modelo Pinhole, la longitud focal o más correctamente, la **distancia principal** es la distancia más corta entre el centro de perspectiva y el sensor. Generalmente los fabricantes conocen de forma aproximada la longitud focal y la almacenan, redondeando al entero, en la información EXIF. Generalmente estas distancias no van a coincidir con las distancias principales de los modelos, pero como primera aproximación será suficiente.

La **posición del punto principal** es un punto que resulta de la proyección ortogonal sobre el sensor del centro de perspectiva en el modelo pinhole. Físicamente es aquel punto del sensor que presenta menores distorsiones. Idealmente, ese punto debería ser el centro geométrico del sensor, pero ligeras imperfecciones en la alineación de las lentes o en la manufactura de la cámara lo desplazarán del

mismo. Generalmente la distancia entre el punto principal y el centro geométrico del sensor serán unas pocas micras o menos, por lo que, como valor inicial, para el ajuste en bloque se pueden utilizar las coordenados de este último.

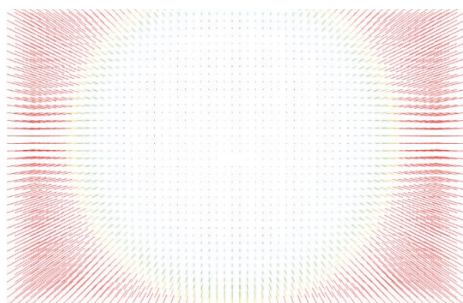


Figura 11. Ejemplo de diferencias entre la trayectoria real y la trayectoria teórica de los rayos de luz dentro de una cámara de fotos Sony Alpha 7. Los mayores desplazamientos están en torno a 50 píxeles.

El recorrido de la luz dentro de una cámara fotográfica real, aunque pueda ser modelizado bastante bien con el modelo pinhole, dista bastante de ser exactamente igual. Para empezar, en vez de tener un punto de perspectiva tenemos un orificio de diámetro no despreciable por donde, obviamente, tiene que poder pasar la luz. Por otra parte, los rayos de luz, que inicialmente viajan en línea recta, cuando atraviesan el interior de la cámara fotográfica sufren muchas pequeñas desviaciones, ya que deben de atravesar numerosas lentes hechas con vidrio u otros materiales y que además pueden tener muy diferentes formas y recubrimientos y entre las que hay huecos con aire, de un índice de refracción muy diferente. Para tratar de acercar el modelo pinhole a la trayectoria real de la luz dentro de una cámara, están los **parámetros de distorsión**, que básicamente modelizan con 4-6 parámetros los desplazamientos esperables en cualquier lugar del sensor. Generalmente estos desplazamientos son muy pequeños y por lo tanto pueden considerarse nulos a la hora de necesitar valores iniciales en el ajuste en bloque. Sin embargo, una vez obtenidos en el ajuste en bloque sí que han de tenerse en cuenta para modelizar de forma precisa una cámara fotográfica (Figura 11).

4.3.2.1 Estimación de posición y orientación de las cámaras (“camera pose”)

En primer lugar hay que indicar que en esta etapa del procesado SfM-MVS, las fotografías que se van alineando lo hacen en un sistema de coordenadas arbitrario. Muchas veces dos de los ejes de ese sistema de coordenadas arbitrarios se toman paralelos a las direcciones principales del sensor de la primera fotografía utilizada, mientras que en centro de perspectiva del modelo pinhole de esa misma primera fotografía se constituye como el origen del sistema de coordenadas. Todas las demás fotografías se irán añadiendo a ese primer sistema de coordenadas arbitrario de forma relativa, es decir, que aunque los parámetros de orientación exterior que obtengamos no van a tener nada que ver con las coordenadas reales de las cámaras en el momento en que se tomaron las fotos, con una traslación, un giro y un cambio de escala si que podrían coincidir. Establecido el sistema arbitrario en una de las fotografías se calcula la orientación relativa del resto.

Para la reconstrucción de la posición y orientación de las cámaras se utilizan los principios de la **geometría epipolar** en los que un punto en la realidad, los centros de perspectiva de las cámaras y los puntos clave homólogos en las fotos forman un plano cuyo producto vectorial es igual a cero. Cuando se tienen varios puntos disponibles (en general se dispondrán de muchos más de los estrictamente necesarios) se utiliza esta imagen redundante para mejorar los parámetros extraídos mediante un primer ajuste de mínimos cuadrados. Cuando se estima la posición y orientación relativa de una foto con respecto a otra, también se puede obtener fácilmente las coordenadas 3D del punto en la realidad que se corresponde con los puntos de interés homólogos en ambas fotos. A estos nuevos puntos los llamaremos **puntos de enlace**.

Para cada par de fotos consecutivas, una vez definido el sistema de referencia arbitrario, se estima la posición y la orientación relativa de la segunda foto con respecto a la previa. Posteriormente, la orienta-

ción relativa y las marcas en las fotos se llevan al sistema de referencia inicial arbitrario. De esta forma se van calculando sucesivamente las posiciones y orientaciones de todas las fotos, comenzando por los pares de fotos que más puntos de interés homólogos comparten y acabando por los que menos.

4.3.4. Ajuste en bloque

La obtención final y precisa de todos los parámetros internos y externos se realiza simultáneamente mediante un **ajuste en bloque**. Es este ajuste iterativo de mínimos cuadrados, se minimiza el **error global de proyección**. Este error cuantifica las distancias, medidas en píxeles, entre los puntos de interés detectados o medidos inicialmente y los que resultan de la retroproyección del punto de enlace 3D ajustado o calculado de vuelta hasta la imagen, para todas las imágenes que solapan en el bloque fotogramétrico. En el ajuste en bloque se resuelve, para cada foto, la posición y orientación final de cada una y también la posición en el espacio de los puntos de enlace que menor error de retroproyección generan. de la intersección en el espacio de cada punto de enlace se genera una nube de puntos dispersos con coordenadas 3D en un sistema de coordenadas arbitrario. Al conjunto de los puntos de enlace, una vez finalizado el ajuste en bloque se le denomina **nube de puntos de enlace**.

Los sistemas de ecuaciones suelen ser sistemas muy grandes y redundantes, con miles de parámetros y de ecuaciones para cuya resolución se emplean técnicas algebraicas avanzadas. Cuando el ajuste en bloque se ejecuta cada vez que se añade una foto se habla de SfM incremental, que es el método estándar y que es muy robusto pero que consume grandes recursos de procesamiento. Por otro lado, se habla de SfM Global cuando se hace un único ajuste una vez ya están estimados todos los parámetros de orientación exterior de las cámaras. Esta metodología es mucho más rápida.

4.4. Georreferenciación del bloque fotogramétrico

En cualquier proyecto geomático, el término georreferenciación hace referencia al conjunto de acciones que permiten dotar al mismo de un sistema de coordenadas específico. Generalmente, el sistema de coordenadas a utilizar será un sistema de referencia de uso general tal como el ETRS89 en Europa continental al que se llega desde otro sistema de referencia anterior mediante una transformación rígida en 3 dimensiones. En el caso de fotogrametría SfM-MVS, las labores de georreferenciación tienen, además, un segundo objetivo que es el de mejorar la calidad geométrica del modelo reconstruido. Esta mejora del bloque se consigue constriñendo la reconstrucción a unas restricciones geométricas, generalmente impuestas a través de puntos de coordenadas conocidas y medidas de una forma muy precisa y fiable, pues de otra manera, en lugar de mejorar la reconstrucción puede llegar a empeorar.

Para georreferenciar un proyecto SfM-MVS pueden utilizarse de forma combinada o independiente dos técnicas básicas; la **georreferenciación indirecta mediante puntos de apoyo en suelo** (ya anticipada en el apartado de trabajos de campo) y la **georreferenciación directa**.

En la **georreferenciación indirecta**, los puntos medidos en campo o el *apoyo de campo* (Figura 12), se marcarán en todas las fotos en que aparecen y estas medidas 2D sobre las fotos se utilizarán como restricciones geométricas para constreñir el ajuste en bloque; es lo que se denomina utilización de **puntos de control**. Además de los puntos de control, en un proyecto SfM-MVS es conveniente reservar parte del “apoyo de campo” para **puntos de comprobación** o *check points*. Estos puntos se miden igualmente en las fotos pero dichas mediciones no constriñen el ajuste en bloque por lo que sus coordenadas calculadas finales en el modelo 3D, comparadas con las medidas en campo son una comprobación muy fiable de los errores que se están cometiendo

en el modelo 3D. La estimación de la precisión y exactitud de una reconstrucción 3D no debería medirse en puntos de control, sino solamente a través de puntos de comprobación.

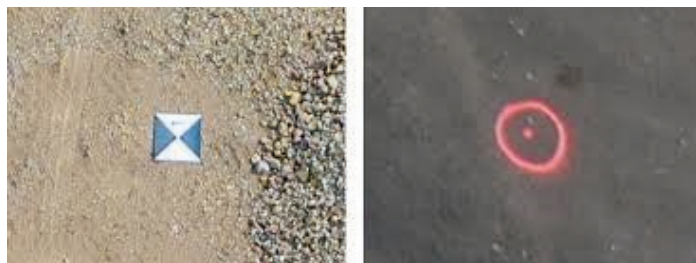


Figura 12. Ejemplo de dos puntos de apoyo.

La técnica de **georreferenciación directa** consiste en conocer para posteriormente aplicar las coordenadas que tenía la cámara del dron en el momento de tomarse la foto. Esa información de coordenadas normalmente es almacenada por todos los drones en los metadatos de las propias fotografías. Dependiendo de las características de geoposicionamiento que incorporan los drones se distinguen varias tecnologías diferentes, cada una con una precisión diferente. En primer lugar, como técnica más básica, la práctica totalidad de drones incorporan receptores que trabajan en **modo autónomo**. En este modo de trabajo, los sensores de posicionamiento calculan su posición a través de los mensajes que les llegan de las distintas constelaciones GNSS, GPS, Glonass, Galileo, BeiDou, etc.

Otra tecnología de georreferenciación directa en drones es la llamada **RTK (Real Time Kinematic)**. En esta tecnología, que requiere de un sensor de posicionamiento adicional que esté fijo durante el vuelo, no solo se emplean los mensajes recibidos desde los satélites para calcular la distancia a los mismos, sino que también se miden los desfases temporales de la propia onda portadora. Medidos estos desfases, se estima el número exacto de longitudes de ondas entre los distintos satélites y el sensor de posicionamiento, lo que mejorara la precisión de las coordenadas de las fotos. Hay una variante de esta

técnica de posicionamiento que se denomina **PPK** (*Post Processed Kinematic*). En esta variante, el cálculo de las coordenadas se hace una vez acabado el vuelo, lo que por un lado requiere de más tiempo, aunque también puede aportar algo más de precisión.

La georreferenciación mediante puntos de apoyo es la forma más precisa y segura de georreferenciar un proyecto fotogramétrico. En general, cuantos más puntos de control se pongan mejor será la georreferenciación del proyecto. Aunque el mínimo absoluto necesario de puntos de control en un proyecto sea de 3, lo mínimo aconsejable es el de 9 puntos. Para proyectos grandes un número de 12-16 puntos de apoyo por cada 100 has es lo recomendado (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

4.4.1. Medición de los puntos en las fotos

“Medir las fotos” en la jerga fotogramétrica significa señalar, en las fotos, el lugar donde aparece un punto de apoyo, ya sea de control o de chequeo. Esta va a ser normalmente la única tarea manual en todo el procesamiento SfM-MVS. A veces puede resultar pesada por la cantidad de mediciones que hay que realizar. Si en un proyecto hay por ejemplo 12 puntos de apoyo y cada punto aparece en 15 fotografías convendrá medir las 180 veces que aparecen las dianas en las fotografías. Es muy importante medir solamente las dianas que se vean correctamente. En caso de introducir mediciones erróneas en las fotos se estarían introduciendo restricciones geométricas que en vez de mejorar el modelo lo estarían empeorando. Además de esto también es necesario conocer o estimar correctamente el nivel de precisión con que se están midiendo las fotos y también la precisión con que se midieron los puntos en campo. Introducir unos valores realistas de estas precisiones en el ajuste en bloque contribuirá a la obtención de la mejor reconstrucción posible.

La medición de fotos se realiza generalmente después del primer ajuste en bloque. Una vez medidas las fotos e introducidas los valores numéricos de las coordenadas será necesario realizar un nuevo ajuste en bloque que ahora si tomará en cuenta la información introducida en las mediciones. Generalmente será conveniente revisar los residuos de todos los puntos para tratar de detectar errores groseros que afecten negativamente a la reconstrucción 3D. Para evitar que estos errores pasen inadvertidos como consecuencia de que el modelo 3D se ajuste a la medición errónea (ya sea en campo o en la foto) es buena práctica sacar del ajuste en bloque uno a uno cada uno de los puntos de apoyo. Al ser esto una tarea bastante pesada puede realizarse mediante un script. Una vez comprobados todos los puntos, se debe hacer un último ajuste en bloque con todos los puntos posibles obteniéndose un modelo 3D definitivo de cámaras y puntos de paso.

4.5. Generación de la nube densa de puntos

Una vez están completadas definitivamente las operaciones de georeferenciación y alineación de cámaras, las cuales pueden ejecutarse varias veces de forma iterativa, comienza la etapa de generación de una nube densa de puntos (Figura 13). En esta etapa se utilizará lo obtenido en el último ajuste en bloque: la nube de puntos dispersa obtenida durante el alineado de las cámaras y las fotografías con una posición y orientación ya definitivas.

Para una generación eficiente de la nube densa de puntos existen varios métodos basados en estereopares como el Patch.Match, el Semi-Global Matching e incluso otros algoritmos basados en la intersección simultánea de más de dos imágenes simultáneas. Luego, además, cada fabricante de software hace sus pequeñas variaciones intentando optimizar y acelerar el proceso. Generalmente estas variaciones no están publicadas formando parte del secreto industrial. Pero dado que todos los algoritmos tienen muchos puntos en común, en este

documento se explicará el algoritmo Patch.Match (Shen, 2013), que a fecha de redacción del documento es el algoritmo implementado en el software open source OpenMVS. Este algoritmo, en resumidas cuentas se usa para una aproximación rápida de coincidencias de vecinos más cercanos entre zonas homólogas de distintas fotos.

4.5.1. Algoritmo Patch.Match

Desde una perspectiva general, el algoritmo Patch.Match tiene 4 fases. En primer lugar se seleccionan los pares. Después se genera mapas de profundidad a partir de la nube de puntos dispersa disponible. En tercer lugar, estos mapas de profundidad se filtran. Por último, los mapas filtrados se fusionan generando la nube de puntos.

4.5.1.1. Selección de par estéreo

La selección del estereopar adecuado entre el conjunto de imágenes disponible es crucial para el proceso de cálculo preciso del mapa de profundidad y la reconstrucción en su conjunto. Para ello, el algoritmo Patch-Match calcula el promedio de los ángulos entre los puntos visibles de la nube dispersa y los centros de las cámaras así como la distancia entre los dos centros ópticos. Después de aplicar un umbral a estos valores (ángulos y distancias) se selecciona como imagen del estereopar aquella de la que resulta el mínimo de los productos escalares, es decir, aquel estereopar en el que las imágenes con los puntos de paso forman el ángulo más parecido a 90° . Este proceso se repite para cada foto, denominada **foto de referencia**, para calcular su correspondiente pareja, denominada **foto objetivo**.

4.5.1.2. Cálculo del mapa de profundidad

El cálculo de los mapas de profundidad para cada uno de los pares estéreo se puede subclasificar en los siguientes pasos.

- **Inicialización aleatoria.** Cada píxel de la imagen de referencia se inicializa con valores aleatorios de profundidad en el rayo de visualización del píxel y una normal en las coordenadas esféricas del centro óptico de la cámara. Esta inicialización no tiene que ser aleatoria para los píxeles de la imagen de destino. Una vez que se completa el cálculo del mapa de profundidad para los píxeles de la imagen de referencia, las profundidades y las normales se pueden utilizar en la imagen de destino para tener una estimación inicial.
- **Homografía.** Para cada píxel p en la foto de referencia, se coloca una ventana cuadrada de tamaño fijo, centrada en p . A continuación se encuentra un píxel correspondiente en la foto de destino usando homografía. Adicionalmente puede calcularse una evaluación de la coincidencia para cada ventana utilizándose una correlación cruzada normalizada (NCC) para todos los píxeles que caen en la ventana.
- **Propagación espacial y asignación aleatoria.** Mediante estas operaciones ejecutadas de forma iterativa se intenta mejorar la homografía. Con la propagación espacial, el plano de un píxel vecino que tenga mejor puntuación en la NCC se propaga a la foto objetivo. Con la asignación aleatoria se prueban pequeños cambios aleatorios en la profundidad y en los parámetros esféricos de la normal.
- **Aplicación de umbral.** Después de las dos operaciones anteriores, se filtran los puntos en el mapa de profundidad cuyo NCC supera un cierto umbral.

4.5.1.3. Refinamiento del mapa de profundidad.

En este paso se comprueba en los mapas de profundidad calculados, que la profundidad de los puntos es consistente en el resto de las

fotos vecinas. En caso positivo, se consideran punto de escena fiable; de lo contrario, se descartan los puntos de los mapas de profundidad.

4.5.1.4. Fusión de mapas de profundidad

Finalmente, se fusionan los mapas de profundidad que se han refinado en los pasos anteriores. Este proceso también incluye la eliminación de redundancia, ya que los mapas de profundidad tienden a tener los mismos puntos en varios mapas. La nube densa en bruto fusionada, bruta tal y como se ha generado será una estructura numérica de puntos aislados definidos por sus coordenadas. Además de esta información básica, en el proceso es posible asignar atributos importantes como el color o el nivel de incertidumbre asociado a la generación del punto. El color se extrae de las fotos mediante proyecciones y la incertidumbre se puede calcular a partir de varios parámetros tales como el número de haces que se han intersecado para calcular el punto, o el ángulo entre los haces. Esta incertidumbre podrá utilizarse posteriormente para filtrar la nube mejorando la confiabilidad de esta.



Figura 13. Ejemplo de una nube de puntos.

5. PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS DERIVADOS

5.1. Nube densa clasificada

Inicialmente y desde un punto de vista funcional, todos los puntos de una nube densa son iguales. Mediante la aplicación de algoritmos automáticos y semiautomáticos que utilizan tanto la geometría de la nube como el color de esta, es posible clasificar la nube densa para el reconocimiento funcional de elementos de vegetación, terreno, vías de comunicación, edificios, acumulaciones de agua, etc. (Figura 14). La mejora de la funcionalidad de estos algoritmos es una línea de investigación cada vez más importante en los últimos años. Por supuesto, también es posible clasificar la nube manualmente, aunque se trata de una tarea ardua y pesada.

Puede considerarse que la nube densa de puntos, -clasificada o no-, es el producto más completo de todos los que se pueden generar con fotogrametría ya que contiene la máxima información geométrica y por tanto, en cierta manera, también la máxima información textural o de color. Sin embargo, las nubes densas de puntos tienen varios problemas. En primer lugar, se trata de un producto no homogéneo; hay zonas en las que hay una densidad de puntos muy alta y en otras zonas no. Se puede intentar homogeneizar, pero siempre será eliminando información. La segunda desventaja de las nubes densas viene debido a su naturaleza discreta. Así pues, cada elemento de la nube ocupa un punto en el espacio 3D y entre punto y punto no hay nada más. Este vacío es un problema a la hora de, por ejemplo, extraer información de

la nube. En tercer último lugar, el gran problema que tienen las nubes de puntos es la cantidad de recursos informáticos que se requiere para su manejo. Hay que tener en cuenta que una nube de puntos puede tener cientos e incluso miles de millones de puntos; cada uno con su color, sus atributos y con sus coordenadas de tres componentes que lógicamente, para tener una cierta precisión, requieren de coma flotante. Todo esto hace que, tal ingente cantidad de información, sea pesado moverla tanto en RAM, como en disco duro.

Los problemas anteriormente referidos hacen que el uso de las nubes densas no esté muy generalizado en muchas aplicaciones de tipo GIS o geomáticas tal y como cabría esperar. En su lugar se utilizan otros productos derivados que subsanan las ventajas a costa de perderse información; dependiendo del tipo de producto derivado de que se trate se perderá más o menos información geométrica o información textural.

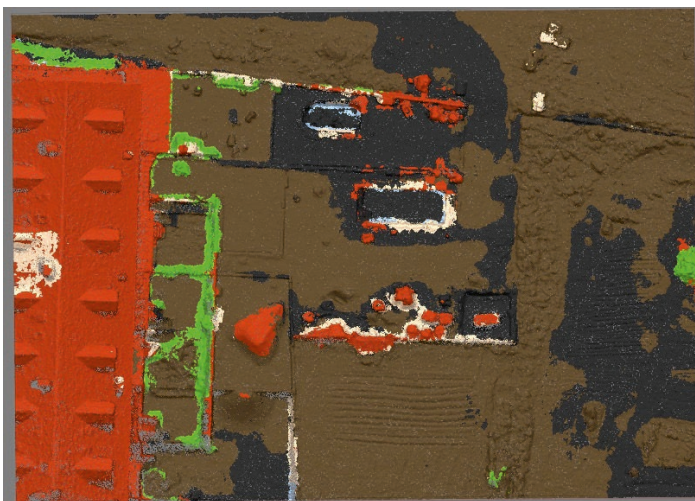


Figura 14. Ejemplo de una nube densa clasificada automáticamente.

5.2. Modelos digitales de elevaciones tipo celda o ráster

Los modelos digitales de elevaciones tipo celda o ráster, habitualmente denominados modelos digitales de elevaciones (MDE) son

estructuras digitales ordenadas que permiten tener digitalizada la geometría de una parte pequeña de la superficie terrestre de una forma muy sencilla y sistemática. En los MDE, la información se ordena en una matriz de filas y columnas cuyas celdas cuadradas también se llaman ráster. Cada celda en la imagen representa una determinada superficie y localización en el terreno. La ventaja computacional de los MDE estriba en que no es necesaria dar las coordenadas de cada celda; como todas las celdas son iguales, es suficiente dar las coordenadas de solamente dos celdas en dos esquinas opuestas e indicar el número de filas y columnas. Una vez escrita esta información en el fichero informático, solo será necesario enumerar las distintas cotas de todas las celdas.

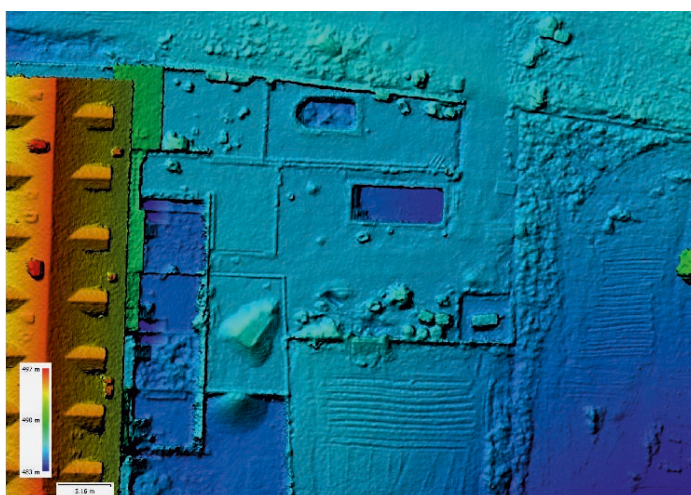


Figura 15. Ejemplo de un modelo digital de elevaciones.

Los MDE tipo ráster se han utilizado desde hace muchos años; los tipos de ficheros más clásicos (asc, bmp, img) solo admiten 1 atributo en coma flotante, que es la cota o altitud media. Por esta razón, al generarse un ráster desde una nube densa, toda la información textural o de color se perderá.

El cálculo de la elevación para cada ráster se realiza cogiendo los puntos cercanos al mismo y ponderando las alturas de estos con la

distancia al centro del ráster. La resolución máxima del ráster debe estar en consonancia directa con la densidad de la nube de puntos, sin llegar abusar de la interpolación, que por otro lado si puede llegar a ser útil para conseguir un producto continuo sin “agujeros” o zonas sin datos.

A veces se distinguen varios tipos de MDE. Por ejemplo, se habla de MDT (modelo digital del terreno) cuando la estructura digital trata de representar la superficie terrestre una vez eliminados los elementos no considerados suelo tales como los árboles o las casas. Cuando se representan todos los elementos el MDE suele denominarse MDS (modelo digital de superficies).

5.3. Modelos digitales tipo curvas de nivel o isohipsas

Las curvas de nivel son un tipo muy eficiente de modelo digital de superficies o del terreno. Con una cantidad muy pequeña de información es posible abarcar una superficie relativamente grande de la superficie terrestre. Las curvas de nivel son unas polilíneas trazadas por los sitios donde el terreno tiene la misma altura o cota. Dependiendo de la cantidad de puntos dentro de la polilínea y la distancia vertical entre polilíneas el detalle geométrico registrado será mayor o menor. En cualquier caso, toda la información geométrica entre las distintas curvas de nivel se pierde, y por supuesto, las curvas de nivel tampoco conservan ninguna información textural. Para tratar de mejorar el detalle de la digitalización a veces si incluyen polilíneas adicionales que marcan líneas de rotura en las pendientes.

Las curvas de nivel son una representación del terreno obsoleta; si bien hace unos años se usaban profusamente en planos, mapas y software topográfico, hoy en día con la mejora de procesado 3D de los ordenadores e incluso dispositivos móviles la eficiencia computacional de las curvas de nivel ya no representa una característica que aconseje su uso.

La generación de curvas de nivel puede realizarse directamente desde la nube de puntos, aunque es más sencillo desde un MDE. El procedimiento consistirá en buscar aquellos puntos de igual cota, -generalmente cotas redondas, de números enteros-, interpolando entre dos puntos de cota conocida.

5.4. Superficies de triángulos o mallas

Las superficies de triángulos o facetas, también llamadas mallas (“mesh”), son un tipo de representación del terreno constituidas por triángulos que se unen a otros triángulos mediante los vértices conformando una superficie continua en 3D en la que cada triángulo es diferente en tamaño y orientación. Con respecto a las nubes densas de puntos, además de ser una superficie continua, tienen la ventaja de manejarse computacionalmente mejor, pues en los últimos años se ha desarrollado y optimizado mucho el hardware que las mueve por el tirón comercial de los videojuegos.

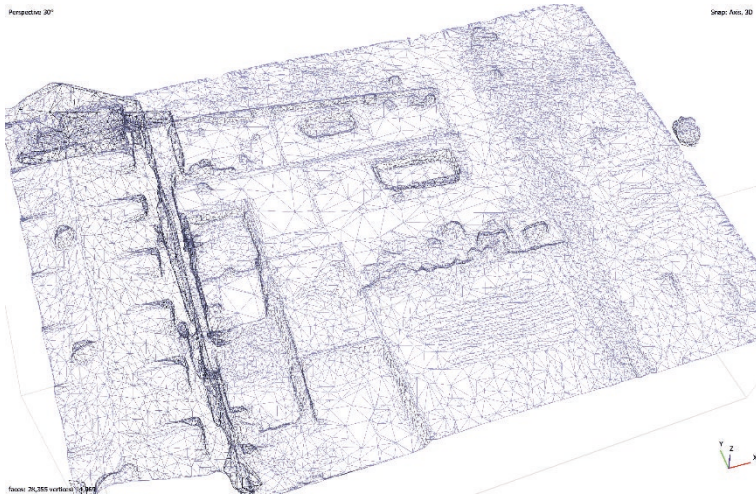


Figura 16. Ejemplo de una superficie de triángulos o mallas.

Las superficies de facetas tienen la capacidad de incorporar texturas tipo ráster en las caras de los triángulos. La combinación de las dos representaciones se ejecuta de forma muy eficiente, y permite mejorar

la apariencia del modelo sin que éste deba tener un número excesivo de triángulos.

Las superficies de facetas pueden generarse directamente a partir de la nube densa o a partir de modelos digitales tipo ráster. Las texturas que colorearán los triángulos se extraen de las fotografías proyectando los triángulos sobre las mismas.

5.5. Mapas de Teselas

Como ya se dijo anteriormente, los ráster se diseñaron hace muchos años para representar geometría de la superficie terrestre y por lo tanto la textura no se contempla en los formatos de ficheros ráster más clásicos. Las texelas son un concepto más moderno, en la que conservándose la ordenación simple de filas y columnas de los ráster se añade, a la cota, información RGB (Red, Green & Blue) del ráster. De esta manera se conserva la simplicidad y eficiencia de los rásteres a la vez que se mejora la visualización de los modelos digitales mediante el aspecto real de los mismos.



Figura 17. Ejemplo de un modelo digital de texelas.

Las texelas tienen dos problemas. En primer lugar, la falta de estandarización de los formatos; cada software funciona con formatos propios de difícil intercambio. En segundo lugar, los ordenadores

actuales están más optimizados para representar las superficies de facetas que en general ofrecen un mejor resultado visual.

5.6. Ortofotos

La ortofoto es el producto fotogramétrico más conocido. Tiene muchas similitudes con los modelos digitales tipo ráster pero en este caso es un producto en el que solo hay textura; las ortofotos no tienen información geométrica que permita conocer la geometría 3D de la superficie terrestre.



Figura 18. Ejemplo de ortomosaico mostrando las “líneas de costura” o límites entre las fotos de origen de las que se extrae la textura.

Las ortofotos se generan mediante un procedimiento que se denomina **ortorectificación**. En la ortorectificación se combina la información textural contenida en las fotografías, la posición y orientación de las fotografías y la geometría 3D del terreno. El proceso parte de un plano horizontal que es el plano de la ortofoto y que tiene cualquier cota arbitraria por debajo del terreno. Una vez dividido ese plano en filas y columnas se elige el primer píxel. Para dar color al píxel se proyecta ortogonalmente hasta el MDE y allí, desde el punto de intersección se vuelve a hacer una segunda proyección, en este caso central o cónica,

hasta la foto, donde se recoge el color que corresponda, y así con el resto de píxeles.

Las ortofotos son un producto muy estandarizado e intercambiable; los ficheros, habitualmente de tipo BMP, TIFF, JPG o PNG son muy habituales en muchas áreas de la informática y prácticamente cualquier ordenador puede acceder fácilmente a la información. A veces las ortofotos están en formatos propietarios, pero suelen ser fácilmente convertibles.

6. PRECISIÓN Y EXACTITUD GEOMÉTRICA DE LA RECONSTRUCCIÓN SFM-MVS Y DE SUS PRODUCTOS

La evaluación de la precisión y exactitud de un modelo 3D se puede hacer de varias maneras. Una forma básica es analizar los residuos resultantes del ajuste en bloque una vez que el modelo está escalado y rotado. Como este método no requiere el uso de mediciones independientes los resultados deberían interpretarse solamente en términos de precisión interna, no de exactitud. Por otra parte, los datos extraídos de este análisis deben ser considerados válidos únicamente en los puntos considerados y su generalización al resto del modelo debe hacerse con prudencia.

La segunda manera de evaluar exactitud y precisión de un modelo, cuando se ha utilizado georreferenciación directa, es comparando coordenadas finales de las cámaras en el modelo con las medidas por el receptor GNSS del dron. En este caso si se puede hablar de exactitud, aunque como es lógico su validez estará condicionada por la propia exactitud de las coordenadas medidas de las fotografías. Aquí el problema radica en que el dron generalmente se está moviendo mientras hace las fotos y por lo tanto la medición de coordenadas es cinemática y no estática, que siempre es más exacta. Otra complicación adicional derivada del movimiento del dron es que siempre hay un cierto desfase entre el temporizador del receptor GNSS y el disparo de la cámara.

La tercera opción que hay para evaluar la calidad geométrica y de georreferenciación de una reconstrucción SfM-MVS es a través de los

puntos de control. En este caso, como si se están utilizando mediciones de puntos en suelo independientes, si se puede hablar de exactitud, aunque como ocurre con la evaluación de los residuos del ajuste en bloque, como los puntos de control se utilizan en el ajuste en bloque, la validez del análisis de exactitudes debiera restringirse a los propios puntos, no debiéndose generalizar para el resto del modelo.

Una mejor manera de evaluar la exactitud de una reconstrucción 3D es analizando errores en **puntos de chequeo**, es decir sobre puntos de apoyo de coordenadas conocidas que no han sido introducidos en el ajuste en bloque. Esta forma de evaluar es la más fiable y objetiva, aunque también es la que más recursos requiere. El problema es que los puntos de chequeo, a diferencia de los puntos de control, al no estar metidos en el ajuste en bloque, no mejoran la geometría de la reconstrucción. Así pues, la tendencia natural es a utilizar todos los puntos de apoyo como de control y no dejar ninguno como chequeo, lo que conlleva finalmente a no tener puntos independientes sobre los que se pueda hacer una buena evaluación de la exactitud del modelo. Una solución a este conflicto de intereses puede pasar por la programación de scripts que analicen los modelos iterativamente mientras se va dejando un punto de cada vez como de chequeo. Una vez evaluada la exactitud del modelo pueden dejarse todos los puntos como de control para hacer finalmente un ajuste en bloque con toda la información disponible.

La exactitud de un proyecto fotogramétrico SfM-MVS realizado a partir de fotografías tomadas por un dron es el resultado de muy diversas variables tales como el diseño del vuelo, la calidad de las fotos, -buena nitidez, tiempo de exposición adecuado, ausencia de ruido-, la calidad de la modelización geométrica de la cámara y finalmente la estrategia de georreferenciación.

Un buen diseño del vuelo debería considerar una altura de vuelo con respecto al suelo que tuviera en cuenta la orografía del terreno

de cara a conseguir una cobertura homogénea del área de interés. La introducción de fotografías oblicuas en el bloque fotogramétrico también ha demostrado mejorar la exactitud de la reconstrucción 3D (James and Robson, 2014), (Sanz-Ablanedo et al., 2020). Con respecto a los solapes longitudinales y transversales se considera, en general, que cuantos más altos son mejor es la reconstrucción 3D. Por último, la utilización de pasadas cruzadas o pasadas a distintas alturas también mejorará el proceso de reconstrucción (Sanz-Ablanedo et al., 2020).

La modelización geométrica de la cámara, - o **calibración de cámara**-, que es el cálculo de los parámetros de cámara que intentar reconstruir analíticamente la trayectoria real de la luz en el interior de la cámara, se resuelve, juntamente con los parámetros de orientación exterior, durante el ajuste en bloque. El conjunto de parámetros, normalmente en un número de 8-12, presenta un alto grado de correlación entre los mismos, superando habitualmente el 99% entre algunos pares. Debido a esta alta correlación, es muy complicado obtener una buena autocalibración con bloques de fotos generalmente cenitales; la consecuencia directa de una calibración insuficientemente precisa es la aparición en la reconstrucción 3D de unos errores característicos en forma de domo (Wackrow and Chandler, 2008). Este tipo de error aparece siempre, en diferentes magnitudes, en todas las reconstrucciones. La mejor forma de mitigar este error es utilizar un número alto porcentaje de intersecciones de haces entre puntos de interés homólogos que tengan ratios base/altura altos. Desde un punto de vista práctico esto se puede conseguir utilizando diseños de vuelo que prescindan de las fotos cenitales (Sanz-Ablanedo et al., 2020), o introduciendo imágenes convergentes en el bloque (James and Robson, 2014). Otra forma de mitigar estos errores es prescindiendo de meter los parámetros de calibración en el ajuste en bloque y utilizar, en su lugar, un conjunto de parámetros calculados de forma previa e independiente; es lo que denomina precalibración. Una buena calibración de cámara ya sea previa o posterior, se podrá identificar analizando la distribu-

ción de los residuos sobre el plano del sensor. Si los residuos tienen un módulo similar en todas las zonas del sensor y no se distinguen patrones sistemáticos se habrá conseguido una buena calibración. Si por el contrario se observan zonas concéntricas u zonas con residuos importantes, - normalmente las esquinas-, la calibración puede ser mejorable y con toda probabilidad el modelo 3D estará afectado del error tipo domo.

Por último, la estrategia de georreferenciación tendrá un papel fundamental en la exactitud del modelo reconstruido. Cuando únicamente se utiliza georreferenciación directa a partir de las coordenadas medidas por el receptor GNSS del dron trabajando en modo autónomo, la exactitud del modelo 3D será del orden de magnitud del metro, en línea con la precisión del receptor. Si el receptor del dron es capaz de trabajar en RTK o PPK, la precisión y exactitud del modelo se puede esperar una exactitud del modelo decimétrica. Únicamente utilizando suficientes puntos de control puede alcanzarse una precisión centimétrica. De acuerdo a algunas investigaciones, si se utilizan pocos puntos de apoyo el error medio cuadrático 3D (3D RMSE) esperable en puntos de chequeo es de ± 5 veces el GSD medio del proyecto. Utilizando un mayor y creciente número de puntos de control (por ejemplo, un número de 3-5 puntos por cada 100 fotos en un proyecto grande) el 3D RMSE convergirá a un valor del doble del GSD medio. Descomponiendo según las direcciones principales, los errores verticales tenderán a ser de 2,5 veces más grandes que las componentes horizontales (Sanz-Ablanedo et al., 2018). La distribución espacial de los puntos de apoyo también es importante; para conseguir los mejores resultados los puntos de apoyo deben estar homogéneamente repartidos por todo el área de interés, idealmente siguiendo una malla triangular ya que de esta forma la distancia de cualquier punto a un punto de control se minimiza. Para un número determinado de puntos de control, utilizar una buena distribución puede reducir los errores a la mitad. Aplicaciones fotogramétricas con drones

7. APLICACIONES FOTOGRAMÉTRICAS CON DRONES

7.1. Usos comerciales actuales

7.1.1. *Movimiento de tierras y minería*

El uso de fotogrametría SfM-MVS con drones ha demostrado ser en los 5 últimos años una tecnología totalmente operativa y eficaz en muchos trabajos de movimiento de tierras y minería. Con anterioridad al uso de drones, la medición de volúmenes de desmontes y terraplenes o cualquier cartografía o medición obligaba a realizar trabajo en campo con receptores GNSS recorriendo, cabezas y pies de taludes, frentes de explotación, escombreras, etc. Hoy en día, el trabajo de campo no se ha eliminado completamente, ya que todavía es necesaria la toma de puntos de apoyo, pero se ha reducido a la mínima expresión.

Los drones además de haber mejorado grandemente las condiciones de trabajo de los técnicos responsables de estas tareas han mejorado la calidad de las mediciones; si antes se interpolaba entre cabeza y talud ahora con las nubes densas de la reconstrucción SfM-MVS es posible tener datos reales de toda la superficie de interés.

7.1.2. *Urbanismo y catastro*

Los drones han posibilitado la realización de ortofotos de gran precisión y gran nivel de detalle en zonas a urbanizar, incluso cuando por alguna razón no hay acceso directo a alguna zona. A partir de

ortofotos es posible crear sistemas de información geográfica con registro fotográfico perfectamente georreferenciado y actualizado de todos los elementos presentes en la zona. En catastro, la posibilidad de realizar ortofotos de gran precisión y resolución igualmente permite realizar mediciones precisas y objetivas favoreciendo los problemas relacionados con la propiedad.

7.1.3. Digitalización del patrimonio

La fotogrametría SfM-MVS, por calidad textural y nivel de detalle, es la técnica geomática más adecuada para el registro y la digitalización casi cualquier elemento con valor patrimonial, histórico o cultural. Cuando parte del elemento a digitalizar tiene difícil acceso por altura o tamaño, los drones suponen una alternativa clara a la instalación de andamios o plataformas verticales.

7.2. Posibles futuras aplicaciones comerciales pendientes de consolidación

7.2.1. Agricultura de precisión

Hoy en día ya están desarrollados todos los medios de hardware y software necesarios para la inspección de cultivos. Así pues, mediante imágenes sintéticas elaboradas a partir de ratios entre reflectancias de distintas longitudes de onda, es posible determinar que zonas de una determinada plantación necesitan más agua, más abono o algún tratamiento.

Sin embargo, esta tecnología todavía no es comercialmente competitiva ya que con lo que tiene que competir es con la simple visita del agricultor a la finca. Solamente cuando la tecnología se simplifique al máximo y las fincas agrícolas tengan una gran extensión la fotogrametría SfM-MVS aplicada a la agricultura de precisión llegará a utilizarse.

7.2.2. Periciales en tráfico

A la hora de registrar escenas en accidentes de tráfico donde sea necesaria la toma de medidas o la modelización de las circunstancias, los drones y la fotogrametría SfM-MVS pueden llegar a ser una tecnología tremendamente rápida y útil. La fotogrametría con drones tiene las ventajas, sobre otras tecnologías competidoras como el láser escáner, de rapidez en la toma de datos, mejor visibilidad con menos zonas de sombras y mejor registro gráfico. Como siempre, el manejo de estas herramientas complejas exige recursos humanos muy especializados que no siempre están disponibles.

7.3. Líneas de investigación en nuevas aplicaciones de fotogrametría SfM-MVS con drones

El número de trabajos de investigación en drones y fotogrametría ha tenido un fuerte crecimiento continuado desde el año 2010 hasta la actualidad. Sin embargo, parece estar estabilizándose en los dos últimos años en los que ha alcanzado un máximo (Figura 19).

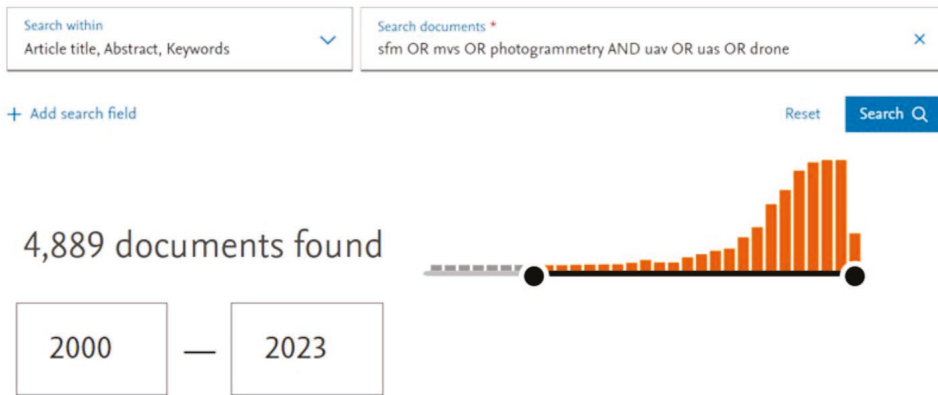


Figura 19. Evolución del número de artículos de investigación en fotogrametría y drones. Búsqueda realizada en Scopus el 22/05/2023

El campo de la ciencia donde más investigación se realiza es en geomorfología, particularmente en la detección de cambios sobre la

superficie terrestre. Esto es así porque la fotogrametría SfM, donde mejor demuestra su potencial es en aplicaciones que involucren superficies relativamente grandes y en las que se requiera una precisión o exactitud centimétrica. Así por ejemplo, son numerosos los trabajos analizando cambios en la criosfera (permafrost, glaciares, casquetes polares, etc...) como consecuencia del cambio climático (Gaffey and Bhardwaj, 2020), en geología estructural y movimientos en fallas activas (Török et al., 2020), en monitorización de volcanes activos (James et al., 2020), en cambios geomorfológicos en la línea de costa (Laporte-Fauret et al., 2019), en geomorfología eólica (dunas) (Grohmann et al., 2020), en geomorfología fluvial o cambios en los cursos de los ríos (Özcan and Özcan, 2021) o en movimientos del suelo como deslizamientos de ladera, creptaciones, o avalanchas, etc. (Tseng et al., 2019). También son reseñables otros estudios en la superficie terrestre como consecuencia de procesos antropogénicos. Así pues en los últimos años se han publicado estudios de cambios en la topografía superficial como consecuencia de actividad minera subterránea (Xiang et al., 2018), cambios en superficie como consecuencia de voladuras subterráneas (Crawford et al., 2021) o estudios geotécnicos (Udovič et al., 2022).

Otras áreas de aplicación en fase de investigación, también importantes están relacionadas con los riesgos naturales (Usman et al., 2021). Así por ejemplo Nichols utiliza fotogrametría SfM MVS con drones para evaluar las consecuencias de inundaciones (Nichols et al., 2022).

En ecología se están realizando muchos estudios sobre control de plantas invasoras (Samiappan et al., 2017), análisis de la distribución de especies (Curcio et al., 2023) o seguimiento de la salud de determinadas plantas (Malenovský et al., 2017).

En patrimonio, aunque la tecnología SfM MVS es ya conocida desde hace mucho tiempo, las investigaciones se realizan sobre la integración

con otras tecnologías como SLAM, sensórica inercial, láser escáner, etc. (Pepe et al., 2022).

Por último son reseñables las investigaciones que se están realizando en agricultura de precisión o gestión forestal; así por ejemplo tenemos trabajos sobre predicciones en la calidad de frutos (García-Fernández et al., 2021), la cuantificación de biomásas en cultivos (Maimaitijiang et al., 2017), estudios fenológico de especies forestales (Gray and Ewers, 2021) o sobre el conteo individual de árboles (Santos et al., 2019).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Beis, J.S., Lowe, D.G., 1997. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces, in: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Presented at the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Comput. Soc, San Juan, Puerto Rico, pp. 1000–1006. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609451>
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering* 37, 855–866.
- Colomina, I., Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Crawford, B., Swanson, E., Schultz-Fellenz, E., Collins, A., Dann, J., Lathrop, E., Milazzo, D., 2021. A New Method for High Resolution Surface Change Detection: Data Collection and Validation of Measurements from UAS at the Nevada National Security Site, Nevada, USA. *Drones* 5, 25. <https://doi.org/10.3390/drones5020025>
- Curcio, A.C., Barbero, L., Peralta, G., 2023. UAV-Hyperspectral Imaging to Estimate Species Distribution in Salt Marshes: A Case Study in the Cadiz Bay (SW Spain). *Remote Sensing* 15, 1419. <https://doi.org/10.3390/rs15051419>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Faugeras, O.D., Maybank, S., 1990. Motion from point matches: Multiplicity of solutions. *Int J Comput Vision* 4, 225–246. <https://doi.org/10.1007/BF00054997>

- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Gaffey, C., Bhardwaj, A., 2020. Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Cryosphere: Latest Advances and Prospects. *Remote Sensing* 12, 948. <https://doi.org/10.3390/rs12060948>
- García-Fernández, M., Sanz-Ablanedo, E., Pereira-Obaya, D., Rodríguez-Pérez, J.R., 2021. Vineyard pruning weight prediction using 3D point clouds generated from UAV imagery and structure from motion photogrammetry. *Agronomy* 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122489>
- Goesele, M., Curless, B., Seitz, S.M., 2006. Multi-View Stereo Revisited, in: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2 (CVPR'06). Presented at the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2 (CVPR'06), IEEE, New York, NY, USA, pp. 2402–2409. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.199>
- Granshaw, S.I., 1980. Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 10, 181–207. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1980.tb00020.x>
- Granshaw, S.I., Fraser, C.S., 2015. Editorial: Computer Vision and Photogrammetry: Interaction or Introspection? *The Photogrammetric Record* 30, 3–7. <https://doi.org/10.1111/phor.12092>
- Gray, R.E.J., Ewers, R.M., 2021. Monitoring Forest Phenology in a Changing World. *Forests* 12, 297. <https://doi.org/10.3390/f12030297>
- Grohmann, C.H., Garcia, G.P.B., Affonso, A.A., Albuquerque, R.W., 2020. Dune migration and volume change from airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and Structure from Motion-Multi View Stereo. *Computers & Geosciences* 143, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104569>
- <http://vision.stanford.edu/> “Problem-Set-3-solutions-ver2.pdf,” n.d.
- James, M., Carr, B., D’Arcy, F., Diefenbach, A., Dietterich, H., Fornaciai, A., Lev, E., Liu, E., Pieri, D., Rodgers, M., Smets, B., Terada, A., Von Aulock, F., Walter, T., Wood, K., Zorn, E., 2020. Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges. *Volcanica* 67–114. <https://doi.org/10.30909/vol.03.01.67114>

- James, M.R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Jebara, T., Azarbajejani, A., Pentland, A., 1999. 3D structure from 2D motion. *IEEE Signal Processing Magazine* 16, 66–84. <https://doi.org/10.1109/79.768574>
- Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., Rosebery, D., 2019. Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, 63. <https://doi.org/10.3390/jmse7030063>
- Lindeberg, T., Bretzner, L., 2003. Real-Time Scale Selection in Hybrid Multi-scale Representations, in: Griffin, L.D., Lillholm, M. (Eds.), *Scale Space Methods in Computer Vision*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 148–163. https://doi.org/10.1007/3-540-44935-3_11
- Lowe, D.G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1150–1157.
- Maimaitijiang, M., Ghulam, A., Sidike, P., Hartling, S., Maimaitiyiming, M., Peterson, K., Shavers, E., Fishman, J., Peterson, J., Kadam, S., Burken, J., Fritschi, F., 2017. Unmanned Aerial System (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 134, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011>
- Malenovský, Z., Lucieer, A., King, D.H., Turnbull, J.D., Robinson, S.A., 2017. Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. *Methods in Ecology and Evolution* 8, 1842–1857. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12833>
- Nex, F., Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Appl Geomat* 6, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nichols, E., Lemnitzer, A., Stark, N., Gardner, M., Mueller, J., 2022. Impact of 2021 Western European Flooding on Geo-Structures. Presented at the Forensic Engineering 2022: Elevating Forensic Engineering - Selected Papers from the 9th Congress on Forensic Engineering, pp. 322–330. <https://doi.org/10.1061/9780784484548.034>

- Özcan, Orkan, Özcan, Okan, 2021. Multi-temporal UAV based repeat monitoring of rivers sensitive to flood. *Journal of Maps* 17, 163–170. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1820387>
- Pepe, M., Alfio, V.S., Costantino, D., 2022. UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. *Applied Sciences* 12, 12886. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Samiappan, S., Turnage, G., Hathcock, L.A., Moorhead, R., 2017. Mapping of invasive phragmites (common reed) in Gulf of Mexico coastal wetlands using multispectral imagery and small unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing* 38, 2861–2882. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1271480>
- Santos, A.A. dos, Marcato Junior, J., Araújo, M.S., Di Martini, D.R., Tetila, E.C., Siqueira, H.L., Aoki, C., Eltner, A., Matsubara, E.T., Pistori, H., Feitosa, R.Q., Liesenberg, V., Gonçalves, W.N., 2019. Assessment of CNN-Based Methods for Individual Tree Detection on Images Captured by RGB Cameras Attached to UAVs. *Sensors* 19, 3595. <https://doi.org/10.3390/s19163595>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Ballesteros-Pérez, P., Rodríguez-Pérez, J.R., 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 2134–2147. <https://doi.org/10.1002/esp.4871>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Rodríguez-Pérez, J.R., Ordóñez, C., 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Serre, T., Kouh, M., Cadieu, C., Knoblich, U., Kreiman, G., Poggio, T., 2005. A Theory of Object Recognition: Computations and Circuits in the Feedforward Path of the Ventral Stream in Primate Visual Cortex.
- Shen, S., 2013. Accurate multiple view 3D reconstruction using patch-based stereo for large-scale scenes. *IEEE Transactions on Image Processing* 22, 1901–1914. <https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2237921>
- Snively, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the World from Internet Photo Collections. *Int J Comput Vis* 80, 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>

- Tomasi, C., Kanade, T., 1992. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. *Int J Comput Vision* 9, 137–154. <https://doi.org/10.1007/BF00129684>
- Török, Á., Bögöly, G., Somogyi, Á., Lovas, T., 2020. Application of UAV in Topographic Modelling and Structural Geological Mapping of Quarries and Their Surroundings—Delineation of Fault-Bordered Raw Material Reserves. *Sensors* 20, 489. <https://doi.org/10.3390/s20020489>
- Tseng, C.M., Chang, K.J., Chen, Y.S., Wang, C.H., Li, C.C., 2019. Evaluation of landslide yielding sediments by using multi-temporal high resolution topographies: 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings, 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0949>
- Udovič, D., Kordić, B., Arbanas, Ž., 2022. Geotechnical Study of Raspadalica Cliff Rockfall, Croatia. *Applied Sciences (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/app12136532>
- Usman, F., Nanda, Nasmirayanti, R., Sumantyo, J.T.S., 2021. Comparative analysis on digital surface model of urban area from Sentinel-1 SAR interferometry and aerial photogrammetry for disaster mitigation plan. Presented at the E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202133104017>
- Wackrow, R., Chandler, J.H., 2008. A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *Photogrammetric Record* 23, 6–18. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x>
- Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y., Tarolli, P., 2018. Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environ Earth Sci* 77, 220. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7383-9>
- Young, R.A., 1987. The Gaussian derivative model for spatial vision: I. Retinal mechanisms. *Spatial Vis* 2, 273–293. <https://doi.org/10.1163/156856887X00222>

**Lección Inaugural del Curso Académico
2023-2024
Campus de Ponferrada**



SERVICIO
DE PUBLICACIONES
UNIVERSIDAD DE LEÓN

