



Universidad de Valladolid

DIGITALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN ESCASAS CONDICIONES LUMÍNICAS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

PABLO VICENTE MARTÍN

Tutor: Antonio Álvaro Tordesillas
Cotutor: David Marcos González

Departamento: Urbanismo y Representación
de la Arquitectura

Septiembre 2024

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN
ARQUITECTURA: INTERVENCIÓN EN EL PATRIMONIO,
REHABILITACIÓN Y REGENERACIÓN

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad de Valladolid



ETSAVA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

A Celia, por su incansable apoyo.

A mis padres, Rosaura y Antonio.

Especial agradecimiento a los amigos
que hicieron posible esta aventura.

A Miguel Fernández Díaz, arqueólogo, piloto de UAVs y especialista en digitalización 3D del patrimonio. Gracias por compartir tu experiencia y conocimientos.

A 3D Stoa - Patrimonio y Tecnología S.L. y a todos los profesionales y empresas que de manera indirecta han colaborado facilitando los datos e información relativa a los casos prácticos de estudio. Sin su colaboración este proyecto no hubiese sido posible.

A mis tutores, Antonio Álvaro Tordesillas y David Marcos González, por su dedicación y ánimos necesarios durante este periodo.

A Darío Fidel Álvarez Álvarez, director del MIIA en esta etapa. Por su acompañamiento, orientación y gestión docente y académica.

A los docentes del MIIA en mi transcurso académico, por acrecentar mis competencias en los campos de investigación e innovación en arquitectura.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE SIGLAS

RESUMEN

PALABRAS CLAVE

| | |
|--|------------|
| 1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO | 1 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 3. OBJETIVOS | 7 |
| 4. FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA SUBTERRÁNEA Y EN ESCASAS CONDICIONES LUMÍNICAS | 8 |
| 4.1. PRINCIPIOS GENERALES DE LA FOTOGRAMETRÍA | 8 |
| 4.2. CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS EN FOTOGRAMETRÍA SUBTERRÁNEA | 17 |
| 5. CONSIDERACIONES EN EL FLUJO METODOLÓGICO | 27 |
| 5.1. CAPTURA DE DATOS EN ENTORNOS SUBTERRÁNEOS Y CONDICIONES LUMÍNICAS ADVERSAS | 27 |
| 5.1.1. PROBLEMAS | 27 |
| 5.1.2. SOLUCIONES | 28 |
| 5.1.3. PROPUESTA | 42 |
| 5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS | 43 |
| 5.2.1. TRATAMIENTO DE IMÁGENES | 43 |
| 5.2.2. GENERACIÓN DE MODELOS 3D | 45 |
| 5.2.3. POSTPROCESADO DE RESULTADOS | 52 |
| 6. CASOS DE ESTUDIO | 54 |
| 6.1. BODEGAS DEL ARRABAL, TALAMANCA DE JARAMA | 56 |
| 6.2. TÚNEL, VALLECAS | 61 |
| 6.3. BODEGAS, VICÁLVARO | 72 |
| 6.4. POZO VIEJO, CORRAL DE ALMAGUER | 76 |
| 6.5. NORIA DEL VIVERO, BAILÉN | 82 |
| 6.6. BODEGA, BRUNETE | 85 |
| 7. REPROCESO DE CASOS DE ESTUDIO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 89 |
| 7.1. REPROCESO DE CASOS DE ESTUDIO | 89 |
| 7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 101 |
| 8. CONCLUSIONES | 103 |
| 9. LÍNEAS FUTURAS: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES | 104 |
| 10. REFLEXIÓN PERSONAL | 106 |

| | |
|--|------------|
| 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 107 |
| 12. ÍNDICE DE FIGURAS..... | 116 |
| 13. ÍNDICE DE TABLAS | 121 |

ANEXOS

ÍNDICE DE SIGLAS

| | |
|---------------|--|
| AHRS | Sistema de Referencia de Actitud y Rumbo (del inglés ' <i>Attitude and Heading Reference System</i> ') |
| AI | Inteligencia Artificial (del inglés ' <i>Artificial Intelligence</i> ') |
| AR | Realidad Aumentada (del inglés ' <i>Augmented Reality</i> ') |
| ASPRS | Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (del inglés ' <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> ') |
| BCRA | Asociación Británica de Investigación de Cuevas (del inglés ' <i>British Cave Research Association</i> ') |
| BMM | Mapeo Móvil mediante Mochila (del inglés ' <i>Backpack Mobile Mapping</i> ') |
| CAD | Diseño Asistido por Ordenador (del inglés ' <i>Computer Aided Design</i> ') |
| CIPA | Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (del francés ' <i>Comite International de Photogrammetrie Architecturale</i> ') |
| DEM | Modelo Digital de Elevaciones (del inglés ' <i>Digital Elevation Model</i> ') |
| GCP | Puntos de Control Terrestre (del inglés ' <i>Ground Control Point</i> ') |
| GNSS | Sistema Global de Navegación por Satélite (del inglés ' <i>Global Navigation Satellite System</i> ') |
| GPS | Sistema de Posicionamiento Global (del inglés ' <i>Global Positioning System</i> ') |
| GSD | Distancia de Muestreo del Terreno (del inglés ' <i>Ground Sampling Distance</i> ') |
| HBIM | del inglés ' <i>Heritage Building Information Modelling</i> ' |
| HDR | Alto Rango Dinámico (del inglés ' <i>High Dynamic Range</i> ') |
| HP | Alto Poligonaje (del inglés ' <i>High Poly</i> ') |
| ICOM | Consejo Internacional de Monumentos (del inglés ' <i>International Council Of Monuments</i> ') |
| ICOMOS | Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (del inglés ' <i>International Council Of Monuments and Sites</i> ') |
| IMU | Sistema de Medición Inercial (del inglés ' <i>Inertial Measurement Unit</i> ') |
| INS | Sistema de Navegación Inercial (del inglés ' <i>Inertial Navigation System</i> ') |
| ISO | Organización Internacional de Normalización (del inglés ' <i>International Organization for Standardization</i> ') |
| ISPRS | Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (del inglés ' <i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> ') |
| LED | Diodo Emisor de Luz (del inglés ' <i>Light Emitting Diode</i> ') |

| | |
|---------------|---|
| LiDAR | Detección y Localización por Luz (del inglés ' <i>Light Detection and Ranging</i> ') |
| LP | Bajo Poligonaje (del inglés ' <i>Low Poly</i> ') |
| MEMS | Sistema Micro Electromecánico (del inglés ' <i>Micro Electromechanical System</i> ') |
| MIIA | Máster en Investigación e Innovación en Arquitectura |
| MMS | Sistema de Mapeo Móvil (del inglés ' <i>Movil Mapping System</i> ') |
| PPK | Cinemática de Postproceso (del inglés ' <i>Post Processed Kinematic</i> ') |
| RGB | Rojo, Verde, Azul (del inglés ' <i>Red</i> ', ' <i>Green</i> ', ' <i>Blue</i> ') |
| RTK | Cinemática en Tiempo Real (del inglés ' <i>Real Time Kinematic</i> ') |
| SfM | Estructura a partir del Movimiento (del inglés ' <i>Structure From Motion</i> ') |
| SIG | Sistema de Información Geográfica |
| SLAM | Sistema de Mapeo y Localización Simultáneos (del inglés ' <i>Simultaneous Localization and Mapping</i> ') |
| SPS | Sistema de Posicionamiento Subterráneo |
| TLS | Escáner Láser Terrestre (del inglés ' <i>Terrestrial Laser Scanner</i> ') |
| UAV | Vehículo Aéreo no Tripulado (del inglés ' <i>Unmanned aerial vehicle</i> ') |
| UIMS | Sistema de Mapeo de Infraestructura Subterránea (del inglés ' <i>Underground Infrastructure Mapping System</i> ') |
| UNESCO | Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (del inglés ' <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> ') |
| USD | Dólar Estadounidense (del inglés ' <i>United States Dollar</i> ') |
| UTM | Sistema de Coordenadas UTM (del inglés ' <i>Universal Transverse Mercator</i> ') |
| VHS | del inglés ' <i>Video Home System</i> ' |
| VISAT | del inglés ' <i>Video Inertial Satellite</i> ' |
| VR | Realidad Virtual (del inglés ' <i>Virtual Reality</i> ') |
| vSLAM | Sistema Visual de Mapeo y Localización Simultáneos (del inglés ' <i>Visual SLAM</i> ') |

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster enfoca la problemática y la necesidad de la digitalización de estructuras subterráneas, y en escasas condiciones lumínicas, a partir de técnicas fotogramétricas.

Se identifican desafíos actuales como son los sistemas de iluminación, la georreferenciación y la captura y el procesado masivo de datos. Y se propone la consecución de un flujo de trabajo común a partir de estudios sobre casos reales, realizados en los últimos años y reprocesados a fecha actual, demostrando su eficacia y aplicabilidad en condiciones lumínicas adversas.

Los resultados arrojan nuevas oportunidades para la documentación y exploración de entornos difíciles de documentar, destacando su importancia en la documentación, conservación y divulgación del patrimonio cultural, así como en la gestión de recursos naturales.

¿Es posible utilizar la fotogrametría pura e independiente para documentar el interior de una estructura subterránea? La cuestión será establecer si los modelos 3D generados resultan precisos y fidedignos con respecto al estudio de estructuras hipogénicas y en comparación con los estándares de la fotogrametría tradicional.

ABSTRACT

The present Master's Thesis focuses on the issues and necessity of digitizing underground structures and environments with low lighting conditions using photogrammetric techniques.

Current challenges such as lighting systems, georeferencing, and the massive capture and processing of data are identified. A common workflow is proposed based on studies of real cases conducted in recent years and reprocessed to date, demonstrating its effectiveness and applicability in adverse lighting conditions.

The results reveal new opportunities for the documentation and exploration of hard-to-document environments, highlighting its importance in the documentation, conservation and dissemination of cultural heritage, as well as in the management of natural resources.

Can pure and independent photogrammetry be used to document 3D models of an underground structure? The question will be to establish whether the generated 3D models are accurate and reliable related to hypogenic structures studies and compared to traditional photogrammetry standards.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría subterránea, Condiciones lumínicas adversas, Digitalización, Conservación, Patrimonio, Innovación.

KEY WORDS

Underground photogrammetry, Adverse lighting conditions, Digitization, Conservation, Heritage, Innovation.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

En el contexto actual, caracterizado por un entorno climático, geopolítico y social en constante cambio, los avances tecnológicos están evolucionando a un ritmo sin precedentes. Estas innovaciones tecnológicas tienen aplicaciones en diversos ámbitos, desde misiones militares hasta el desarrollo de videojuegos. El campo de la Digitalización del Patrimonio, en particular, ha experimentado una transformación significativa gracias a la incorporación de estas tecnologías, lo que ha potenciado la documentación, protección y divulgación del patrimonio cultural y natural.

Un ejemplo ilustrativo de la necesidad de esta tecnología es la desaparición de la Ventana Azul en la Isla de Gozo, Malta (Figura 1), un paraje de naturaleza rocosa en forma de arco unida al acantilado, asemejando ser una ventana al mar, que colapsó en marzo de 2017 debido al paso del tiempo, la erosión y un fuerte oleaje (Figura 2). Este enclave natural, que fue un atractivo turístico y escenario de producciones audiovisuales, tales como “Game of Thrones” o la película “El Conde de Montecristo” ya no se puede apreciar en su forma original, lo que revela la importancia de la digitalización para la conservación del patrimonio antes de que desaparezca.



Figura 1. Ventana Azul de Malta. Fuente: Elaboración propia (2015).



Figura 2. Derrumbe ventana Azul de Malta. Fuente: Guía de Malta (2017).

Actualmente, como plantea The Svetozar Andreev Studio junto con la diseñadora de interiores Elena Britanishskaya, se intenta fusionar la naturaleza y el tiempo en una réplica en estructura de acero evocando el pasado (Figura 3).



Figura 3. Ventana Azul de Malta Artificial. Fuente: Andreev, S. (2018).

Otro incidente a destacar es el incendio de la Catedral de Notre Dame, en París, ocurrido el 15 de abril de 2019. La reconstrucción de esta estructura ha sido posible gracias al gemelo digital creado por Ubisoft para el videojuego Assassin's Creed, que se convirtió en un referente para historiadores y arquitectos en el proceso de rehabilitación, y cuya finalización está prevista para 2024.

En el verano de 2023 tuve la oportunidad de visitar la sima de Gouffre de Padirac (Figura 4 y Figura 5), en la región de Lot, Padirac (Occitania, Francia). Este impresionante enclave subterráneo, con sus asombrosas formaciones geológicas y una red de 42 km de galerías de ríos subterráneos (Figura 6), plantea un reto fascinante para la documentación y conservación debido a sus escasas condiciones lumínicas y reducida accesibilidad.



Figura 4. Gouffre de Padirac. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Gouffre de Padirac. Fuente: Elaboración propia.

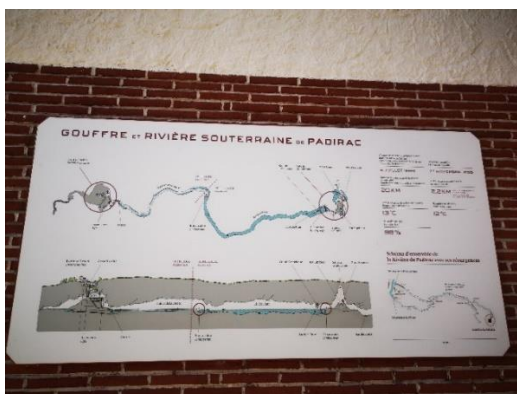


Figura 6. Gouffre de Padirac, planta y sección. Fuente: Elaboración propia.

Estos ejemplos ponen de manifiesto que la tecnología ejerce un papel vital en la conservación del patrimonio.

La contribución a la digitalización de entornos particularmente inaccesibles y con escasa o nula iluminación es el objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Máster. Según Letellier *et al.* (2007), “El registro, la documentación y la gestión de la información se encuentran entre todas las actividades centrales del proceso de toma de decisiones para la gestión de la conservación del patrimonio y constituyen una parte plenamente integrada de la investigación y el tratamiento”. A través de este trabajo se pretende, además de respetar las huellas del tiempo, avanzar en la documentación precisa y la preservación de nuestro patrimonio cultural y natural, proporcionando una herramienta valiosa para las próximas generaciones.

2. JUSTIFICACIÓN

La idea del presente Trabajo de Fin de Máster nace del interés por la protección de entornos y espacios susceptibles de ser cambiantes o alterados, bien por la acción del hombre o por el propio devenir de la naturaleza. Se pretende contribuir a la preservación del legado patrimonial hacia generaciones futuras y “dar a conocer el significado de los lugares del patrimonio cultural mediante el reconocimiento cuidadoso y documentado de su importancia” (Carta para Interpretación, 2008).

El libro *Conservación del patrimonio cultural. Teoría, historia, principios y normas* (González Varas, 2018), expone la evolución conceptual de “monumento histórico-artístico”, “patrimonio histórico o cultural” y “bien cultural”. De esta lectura se desprende que el patrimonio cultural, material e inmaterial, resulta inherente a la presencia y actividad humana a lo largo del tiempo.

A lo largo de la historia, uno de los conceptos primigenios sobre patrimonio consiste en el nexo vinculante de las generaciones pasadas con las futuras a través de la memoria (Benavides López, 2017). A partir del Renacimiento se empiezan a valorar las antigüedades, sentando las bases de lo que se denominará en la época contemporánea como “monumento histórico-artístico”. Posteriormente, a través de una reflexividad teórica y práctica, conocida como una maduración crítica, nace el término de “patrimonio cultural” (Vicente Martín, 2021).

La “Carta europea del Patrimonio Arquitectónico” expone que “el patrimonio arquitectónico europeo está formado no sólo por nuestros monumentos más importantes, sino también por los conjuntos que constituyen nuestras ciudades y nuestros pueblos tradicionales en su entorno natural o construido” (Carta de Amsterdam, 1975).

El artículo 1 de la Ley de Patrimonio Histórico Español (Gobierno de España, 1985) completa la definición anterior y contempla que “Integran el Patrimonio Histórico Español los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte de éste el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques que tengan valor artístico, histórico o antropológico”.

A través de “la singular particularidad de los bienes patrimoniales” (Manzini, 2011), se disciernen diferentes rangos o categorías dentro del concepto “patrimonio” infundidas por alicientes artísticos, culturales o económicos. Dicha categorización confiere al propio bien una aptitud única, intransmisible e insustituible que “existe la responsabilidad colectiva de protegerlo y conservarlo” (González Varas, 2018).

En el ámbito de la restauración, conservación y documentación, surgen documentos como la “Carta de Atenas” (Carta de Atenas, 1931), “Carta de Venecia” (Carta de Venecia, 1964), “Carta di Restauo” (Brandi & De Angelis, 1972), “Carta de Burra” (Carta de Burra, 1979), “Convención de Granada” (Consejo de Europa, 1985) o la “Carta de Cracovia” (Carta de Cracovia, 2000), que discuten sobre el papel de la documentación y su evolución en el tiempo.

Reconocidas las exigencias sociales e institucionales para con la conservación y protección del patrimonio, el escalón posterior consiste en cómo “dejar constancia de él, de su estudio, de sus análisis y de sus conclusiones para su valorización y divulgación como antesala al registro, inventariado y catalogación ante futuras intervenciones y restauraciones” (Vicente Martín, 2021).

La base de la documentación, entendida como técnica, es el conocimiento; siendo éste “el primer nivel de salvaguarda” y “soporte indispensable para la tutela del patrimonio cultural” (Carta de Nápoles, 1999). Por ello es necesario “elaborar una documentación precisa, en forma de informes, ilustrados con dibujos y fotografías”, que “será depositada en los archivos de un organismo público y puesta a la disposición de los investigadores, recomendando su publicación” (Carta de Venecia, 1964).

Por tanto, los principales objetivos de la documentación son realizar “un uso apropiado en materia de investigación, gestión y conservación; proporcionar un registro permanente de todos los monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios que son susceptibles de ser destruidos como consecuencia de riesgos naturales o derivados de la actividad humana; y facilitar la documentación a las administraciones responsables de la protección y conservación con el fin de favorecer políticas y decisiones adecuadas” (Benavides López, 2017).

Organizaciones internacionales tales como la Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) han promovido convenciones, cartas y normas que se encargan de “legislar” y reformular la evolución conceptual de “patrimonio”.

En el año 1968 se crea el Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (CIPA), que posteriormente pasó a denominarse CIPA Heritage Documentation. Este Comité Científico nace de la necesidad de documentar tridimensionalmente el patrimonio de la mano del ICOMOS y colaborando con la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS).

La propia UNESCO, en el programa Memory of the World, en 1992, expone la “necesidad de favorecer el acceso universal al patrimonio documental”, incluyendo fomentar que “las copias digitalizadas y los catálogos estén disponibles en Internet”. Es decir, asegurar el acceso y disponibilidad del patrimonio a través de la tecnología. Así nace el término “digitalización”, si bien en un primer momento, en ámbitos puramente fotográficos, se interpretó como “conversión digital” (Cía & Fuentes, 2000).

Una definición más concisa sobre documentación tridimensional nos la ofrece Valle Melón (2007), en su Tesis Doctoral “Documentación Geométrica del Patrimonio: Propuesta conceptual y metodológica”. Define documentación geométrica como “el conjunto de registros y resultados obtenidos de la aplicación de ciencias y técnicas que posibilitan la detección, medida y representación de las cualidades geométricas relativas a la forma, dimensiones y disposición espacial de los objetos constitutivos del patrimonio”.

Años más tarde, el Diario Oficial de la Comisión Europea del 27 de octubre de 2011, sobre digitalización, accesibilidad y conservación, expresa lo que venía siendo una realidad:

La digitalización facilitará el acceso al patrimonio y su conservación en el entorno digital, además de ampliar el acceso al material cultural. El 10 de noviembre de 2021, la Comisión Europea actualiza su impronta recomendando “a los Estados miembros que aceleren la digitalización de todos los monumentos y sitios del patrimonio cultural, objetos y artefactos para las generaciones futuras, para proteger y preservar aquellos en riesgo, e impulsar su reutilización en ámbitos como la educación, el turismo sostenible y los sectores culturales creativos”.

Precisamente, el proyecto Europeana, creado en 2005, busca dar acceso a los recursos digitales e insta a su colaboración a los Estados de la Unión Europea. Es una idea alentada año tras año mediante la presentación de gemelos digitales. Esta importancia se pone de manifiesto con la presentación, en mayo de 2024, de una fortificación de la ciudad de Luxemburgo caracterizada por sus galerías subterráneas.

Así pues, esta digitalización “debe ser entendida como una parte de la estrategia general de la conservación y, como tal, debe estar supeditada a la deontología que la preside” y “debe ser entendida como una disciplina científica” (Cía & Fuentes, 2000).

Retrotrayéndonos a 1996, el ICOMOS infiere la necesidad de titulaciones y estudios especializados porque “la complejidad de los procesos de documentación e interpretación requiere el despliegue de personas con la habilidad, el conocimiento y la conciencia adecuados para las tareas asociadas. Puede que sea necesario iniciar programas de formación para lograrlo” (ICOMOS, 1996).

En el caso de la fotogrametría y técnicas afines, el factor diferencial se encuentra en la toma de datos, confiando a la imagen todo el valor sobre el que se sustenta el proyecto. Para Pereira Uzal (2024), “la imagen como dato requiere de interpretación para generar conocimiento”. Por tanto, “la transcodificación de la imagen-materia en imagen-código puede contribuir a la comprensión de un bien cultural en el futuro” relacionando el concepto del tiempo, entendido como el momento de la toma de datos, con el concepto de preservación de la información susceptible de ser codificada en formato imagen.

Muñoz Viñas (2003) relaciona la preservación con la conservación dado que, para él, ésta es “la actividad que consiste en adoptar medidas para que un bien determinado experimente el menor número de alteraciones durante el mayor tiempo posible”.

Surge un nuevo concepto que para este autor resulta redundante: la conservación preventiva. El Consejo Internacional de Monumentos (ICOM) la define como “todas aquellas acciones que tengan como objeto evitar o minimizar futuros deterioros o pérdidas”, asegurando que ninguna de estas medidas interfiera en el material o la estructura del propio bien, no modificando su apariencia (Comité ICOM-CC, 2008).

Esta idea confecciona una inmortalización del bien, encuadrándola en un marco espacio temporal concreto a través del que “desde un tiempo presente se podría entender cuál era su significado en un tiempo pasado o cómo era su apariencia en ese preciso momento, pero con la desaparición del objeto se desvanece el vínculo con el tiempo y la materia, lo efímero o lo cambiante se hacen permanentes y adquieren una forma de significar” (Pereira Uzal, 2024).

Al hilo de esta preservación y conservación preventiva, es necesario recordar que toda actuación y técnica ejercida sobre un bien patrimonial conlleva aparejada la toma de decisiones y depuración de responsabilidades.

En consecuencia, la intervención adoptada debe basarse en el principio de reversibilidad que radica de la investigación reflexiva del bien a documentar (Carta de Cracovia, 2000).

En la Figura 7 se muestra un resumen de lo expuesto en este apartado.

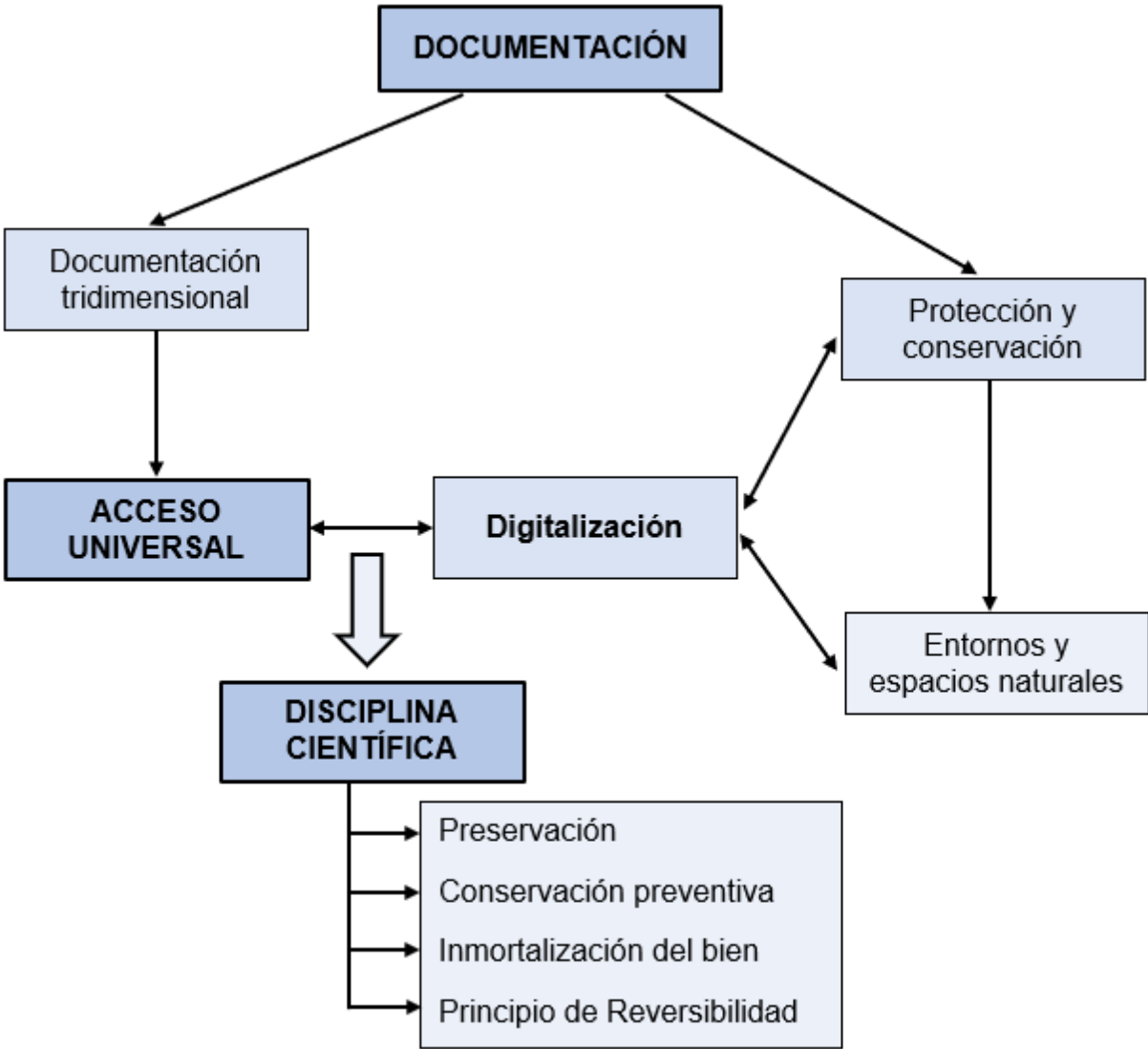


Figura 7. Esquema de la justificación del Trabajo de Fin de Máster. Fuente: Elaboración propia.

3. OBJETIVOS

La fotogrametría subterránea es una aplicación especializada de la fotogrametría tradicional utilizada para obtener modelos tridimensionales de cavidades subterráneas, como cuevas y túneles. A diferencia de la fotogrametría aérea o terrestre, la fotogrametría subterránea implica tomar imágenes dentro de espacios subterráneos utilizando fuentes de luz artificial.

Las aplicaciones de la fotogrametría subterránea incluyen la documentación de patrimonio cultural y arqueológico, la exploración de recursos minerales, la inspección de infraestructuras subterráneas y la cartografía de cuevas para la investigación científica y el turismo.

El objetivo principal de esta investigación es:

- **Evaluar la técnica fotogramétrica**, sustentada por un flujo de trabajo común, enfocada en la digitalización de estructuras subterráneas y en escasas condiciones lumínicas a partir de técnicas fotogramétricas.

Además, existen dos objetivos específicos:

- **Resolver la iluminación de manera artificial.**
- **Solventar la georreferenciación del modelo 3D hipogénico.**

4. FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA SUBTERRÁNEA Y EN ESCASAS CONDICIONES LUMÍNICAS

4.1. PRINCIPIOS GENERALES DE LA FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es el procedimiento para realizar mediciones a través de fotografías y determinar la geometría de un objeto o espacio físico a partir de un registro automático de dichas imágenes. Etimológicamente, fotogrametría significa medir gráficamente a partir de un haz de luz.

La consideración de la técnica fotogramétrica reside en la propia imagen fotográfica, siendo ésta “una proyección de la luz reflejada o emitida por un objeto o escena en un plano focal”, que almacena “como archivo digital la información radiométrica (luz-color) y espacial (espacio-formas)”. Es decir, es una codificación en formato de imagen digital de “la información lumínica y espacial de las escenas y objetos captados por una matriz de detectores de luz (cámara digital)” (Pereira Uzal, 2024).

La imagen digital puede definirse a partir de una expresión matemática formada por la dirección del píxel (i, j), el número de filas (N) y el número de columnas (M). “La cuantización de la imagen asignará a cada localización discreta (x, y) un valor entero $2b$, tomando b valores de: 2, 4, 8, 12, 16 o 32 bits por píxel. De esta forma, la resolución radiométrica describirá el número de bits por píxeles en una imagen” (Gonzalez Aguilera, 2018).

Por tanto, en el contexto histórico, la fotogrametría, definida en sentido estricto, no surgirá hasta la aparición de la fotografía. Sin embargo, a lo largo de la historia, intelectuales de diferentes ámbitos, utilizando los métodos disponibles en sus respectivas épocas, establecieron las bases hasta llegar a lo que hoy conocemos como fotogrametría.

El primero de ellos, Aristóteles, en el año 350 a.C., mencionó el proceso de proyección óptica de imágenes. Pintores como Leonardo Da Vinci y Alberto Durero investigaron sistemáticamente sobre las leyes de la perspectiva. En 1636, Girard Desargues publicó su primer libro con el objetivo de racionalizar la geometría proyectiva. Y poco más de un siglo después, vio la luz *Freye Perspective*, un texto publicado en 1759 por el matemático alemán Johann H. Lamberts, donde ya entonces sugería que los principios de la perspectiva podrían utilizarse para crear mapas y planos (García García, 2015).

En 1824, Joseph Nicéphore Niépce consiguió fijar una imagen después de días de exposición, tal como recoge en sus diarios. Aunque de la primera fotografía de la que se tiene constancia, Vista desde la ventana en Le Gras (1826) (Figura 8), es la capturada con ocho horas y diez minutos de exposición, es decir, con ocho horas de apertura del obturador, consiguiendo una iluminación uniforme en toda la imagen. A estas primeras impresiones fotográficas las llamó heliografías, que significa escritas por el sol.



Figura 8. Vista desde la ventana en Le Gras. Fuente: Aragon, S. (2023).

Este hecho propició que Louis Jacques Mandé Daguerre se asociase con Niépce en 1829 en una colaboración que duró hasta la muerte de éste en 1833. En 1839, Daguerre publicó la primera fotografía comercial, realizada mediante un procedimiento que él mismo denominó daguerrotipo. El daguerrotipo es un sistema de exposición y revelado perfeccionado a partir de una técnica inventada por Joseph Niépce (Sadurní, 2024).

Inevitablemente, la fotogrametría ha estado y está vinculada a los avances científicos. Aimé Laussedat, topógrafo militar que comenzó sus investigaciones a partir de la década de 1840, es considerado el precursor de la fotogrametría. A medida que el uso de la fotografía se fue popularizando surgieron nuevas utilidades, como la que implementó Laussedat hacia 1860 (Polidori, 2020). Se basó en la fotografía para realizar planos topográficos militares a partir del diseño y la construcción del primer fototeodolito, definiendo esta técnica como metrofotografía (Sánchez Sobrino, 2006).

El arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer, a partir de 1859, continuó utilizando el método popularizado por Laussedat. Según Albertz (2002), motivado tras un accidente tomando mediciones directas en la catedral de Wetzlar, Meydenbauer exploró la posibilidad de tomar mediciones indirectas sobre fotografías basándose en las intersecciones de las mismas para el levantamiento de edificios. Bastaba conocer la posición desde la que se toma la fotografía y las direcciones de los ejes ópticos de la cámara de cada estación. A este método Meydenbauer lo denominó por primera vez como fotogrametría.

Tal fue la influencia de la fotogrametría de la mano de Meydenbauer que, por encargo del Ministro de Cultura de Prusia, se creó el Royal Prussian Photogrammetric Institute el 1 de abril de 1885, constituyendo la primera institución de fotogrametría de la historia. La calidad de sus trabajos e investigaciones se reflejó en la elaboración de planimetrías con precisiones de 0,2 mm (Albertz, 2002).

En 1901, para facilitar la identificación de puntos homólogos a partir de la visión estereoscópica, Pulfrich inventó el estereocomparador. Basándose en él, Von Orel, en 1909, diseñó el primer restituidor estereoscópico, al que denominó estereoautógrafo; aparato que va a permitir el trazado de curvas de nivel continuas.

Uno de los grandes avances hasta la fecha radica en la aparición de los primeros aviones, que permitieron que se tomaran las primeras fotografías a bordo, en 1909. Esta idea ya se había llevado a cabo desde globos aerostáticos, continuando con la búsqueda de los pintores militares de cartografiar las ciudades desde el aire con fines militares.

Los obstáculos iniciales partían entonces de no conocer la posición ni la orientación de la cámara en el instante en que se efectúa la fotografía. Sin embargo, en 1924, Von Gruber solventó el problema de la orientación de la cámara y, a partir de ese momento, se desarrolló la fotogrametría analógica.

Buill Pozuelo *et al.* (2003) tratan la fotogrametría analítica y sus avances enfocados en la cartografía; Linder (2006), en su libro *Digital Photogrammetry: A Practical Course*, resume los hitos dentro de la evolución de la fotogrametría; y González Aguilera (2018), para la asignatura de Procesamiento Avanzado de Imágenes, los concreta. A raíz de la aparición del primer ordenador y durante las décadas de 1940 y 1950, Church, Smith y Brown continúan las investigaciones de Finsterwalder y desarrollan modelos matemáticos para resolver el problema fotogramétrico. En el ámbito de la aerotriangulación aparecen estudios sobre monocomparadores y estereocomparadores, formando el 'input' en modo 'off-line' para algoritmos programados por ordenador.

Además, se señala que el finlandés Helava, en 1957, desarrolló el primer restituidor analítico basado en la alimentación 'on-line' de datos para los algoritmos, de manera que permitía simular la capacidad operativa de los restituidores analógicos. Por otra parte, Hobrough, en 1959, estudió una correlación analógica a partir de 'hardware' que comparaba niveles de grises entre dos imágenes.

En 1977, The Gestalt Photomapping System consiguió una correlación automática y un procesamiento automatizado "off-line" de modelos digitales del terreno. Es decir, permitía realizar una planimetría con relieve a partir de fotografías tomadas en vuelo (estereofotogrametría) (Kelly *et al.*, 1977).

Los restituidores analíticos comienzan a comercializarse dentro del mercado fotogramétrico a partir de 1975 y, en la década posterior, van desbancando a sus predecesores. También Kreiling (1976), Helava (1977) y Hobrough (1978) continúan los estudios referentes a la correspondencia de imágenes mediante correlación digital.

En definitiva, un restituidor analógico realiza los procesos de orientación a partir de métodos ópticos y mecánicos, y uno analítico lo lleva a cabo mediante procesos informáticos por ordenador. Sin embargo, durante la evolución de un modelo a otro surgen los restituidores semianalíticos, es decir, restituidores que en concepto resultan analógicos, pero cuentan con sensores que captan las coordenadas del terreno para enviarlas a un sistema CAD ('Computer Aided Design').

Por tanto, el proceso fotogramétrico busca conseguir la correlación automática de imágenes, comúnmente conocido como 'matching'. El 'matching' consiste en encontrar puntos homólogos en fotogramas de las imágenes digitales a partir de un patrón de búsqueda aproximado. La zona previamente seleccionada actúa como la matriz de búsqueda donde se localizará dicho patrón (Figura 9).

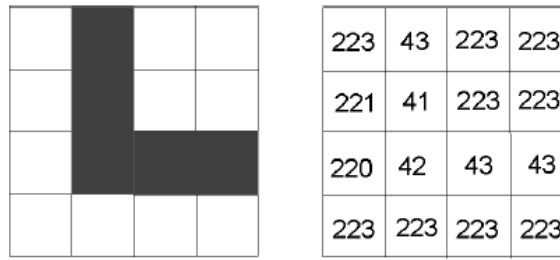


Figura 9. Matriz y patrón de búsqueda. Fuente: Sánchez Sobrino, J. A. (2006).

Es en 1972 cuando Bonneval establece el *Método General de la Fotogrametría*; basando su teoría en el haz de luz perspectivo, en su formación y en su reconstrucción. El primer paso es la captura fotográfica en la que el haz perspectivo queda registrado en la imagen fotográfica. El segundo establece las coordenadas del punto correspondiente sobre la superficie del objeto a través de una orientación interna, una orientación externa, la identificación de rayos homólogos y la representación del punto objeto.

La fotogrametría analítica permite, a partir de las condiciones de colinealidad y coplanaridad, que las relaciones entre las coordenadas de la fotografía y las coordenadas del objeto sean expresadas matemáticamente.

El principio de colinealidad asegura que una misma recta contiene el centro de proyección, el punto imagen y el punto sobre el objeto (Figura 10). Matemáticamente, dos vectores son colineales si tienen la misma dirección, es decir, si son vectores directores de rectas paralelas. Estos vectores no tienen que tener el mismo sentido.

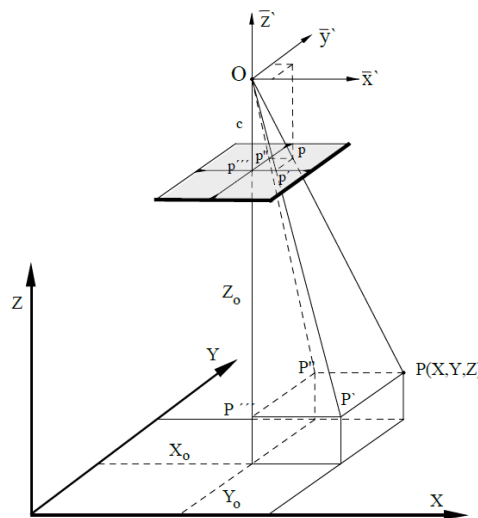


Figura 10. Toma fotográfica ideal (imagen paralela al sistema terreno). Condición de colinealidad. Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001).

La solución de cualquier problema que implica las ecuaciones de colinealidad se obtiene mediante la inserción de valores conocidos para después resolver las otras incógnitas. Aunque en la práctica hay algunas dificultades, las ecuaciones son no lineales y necesitan ser linealizadas para obtener una solución. Al resolver un sistema de ecuaciones de colinealidad se necesitan aproximaciones iniciales para todas las incógnitas. Éstas no tienen que tener un valor cercano al real, pero cuanto más cercano sea menos se tardará en dar con la solución.

El principio de coplanaridad establece que los dos centros de perspectiva, cualquier punto del objeto y los dos puntos de imagen correspondientes se encuentran en un plano común (Figura 11). Para satisfacer esta condición los tres vectores deben ser coplanares; es decir, que su triple producto escalar sea cero.

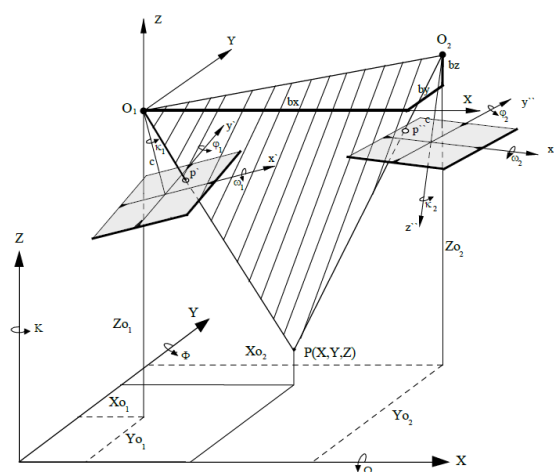


Figura 11. Condición de coplanaridad. Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001).

Al igual que las ecuaciones de colinealidad, la condición de coplanaridad es no lineal y debe ser linealizada para dar una solución. Las ecuaciones de observación linealizadas varían dependiendo del punto de control. Cada punto de control produce cuatro ecuaciones de observación (dos por la foto izquierda y dos por la derecha) e introduce tres incógnitas adicionales. Se necesita medir un mínimo de cinco puntos para obtener cinco ecuaciones y cinco incógnitas. La coplanaridad no se utiliza tanto como la colinealidad en fotogrametría analítica. En consecuencia, la condición de coplanaridad es un método muy rápido y económico en orientación relativa.

El nacimiento del algoritmo *Structure from Motion* (SfM) (Ullman, 1979) aportó una nueva dimensión a lo que hasta entonces se conocía como fotogrametría y sentó las bases de su evolución posterior. Hasta ese momento, en la toma de datos, existía un proceso de digitalización que buscaba conocer determinadas coordenadas en un entorno bidimensional, mientras que en el proceso SfM existe un proceso de modelado a través de modelos matemáticos. Es decir, “el SfM automatiza la detección de puntos homólogos a través de la detección automática de características de la imagen” (Pereira Uzal, 2024).

En el año 1989, Schenk, junto con la aportación de Greenfeld, contribuyen al campo de la fotogrametría y teledetección documentando experimentos con emparejamiento estéreo basado en bordes en su libro *Experiments with Edge-based stereo matching*, para conseguir un método de correspondencia de imágenes.

Por otra parte, el propio Schenk, en 1999, escribe sobre los antecedentes, fundamentos y orientación automática en su libro *Digital Photogrammetry*.

Kasser y Egels, autores del libro *Digital Photogrammetry* (2002), tratan la restitución de fachadas a partir de la técnica estereográfica usando ‘*stereo pairs of images*’ (Figura 12), donde las direcciones de la cámara deben ser (casi) paralelas entre sí para una correcta visión estereoscópica.

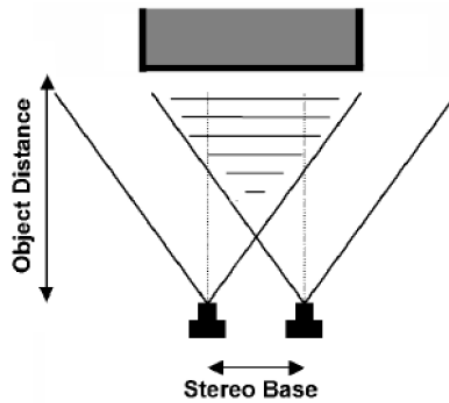


Figura 12. 'Stereo pairs of images'. Fuente: Kasser, M. y Egels, Y. (2002).

Para reconstruir un objeto completo no será suficiente el uso de un único par estéreo. Plantean la solución de *'bundle restitution'* o restitución de paquete, necesitando más imágenes para cubrir el modelo. La estrategia de toma de datos consiste en que cada punto a determinar debe cruzarse con, al menos, dos rayos desde un ángulo de intersección válido (Figura 13). Debido a la alta redundancia del sistema planteado, es posible detectar errores graves, por lo que no solo se aumentará la precisión sino también la fiabilidad del resultado. El *'bundle restitution'* es una técnica de toma de datos que, con la tecnología actual, permite resolver la orientación de la totalidad de las imágenes gracias a los potentes *'softwares'*.

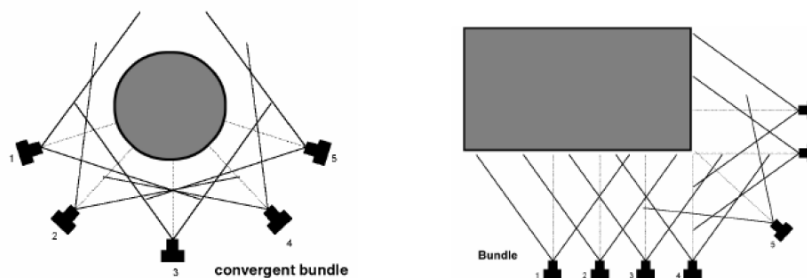


Figura 13. Ejemplo de diferentes configuraciones de *'bundle solution'*. Fuente: Kasser, M. y Egels, Y. (2002).

Esta evolución en la técnica dio pie a un proceso hacia la minimización de errores, en este caso, conocido como *'bundle adjustment'* (Snavely *et al.*, 2007).

En la actualidad, tal como venía demandando el uso integral de fotogrametría aérea y terrestre y como preveían algunos estudiosos en la materia, estos *'softwares'* fotogramétricos han evolucionado hasta el punto en el cual son capaces de conjugar múltiples imágenes independientemente de que éstas no mantengan la misma orientación interna y externa de la cámara (Figura 14 y Figura 15). Dichos *'softwares'* analizan las imágenes en función de sus metadatos y las posicionan entre sí. Este proceso, aunque posible, conlleva un mayor consumo de recursos en cuestión de tiempo y *'hardware'*.

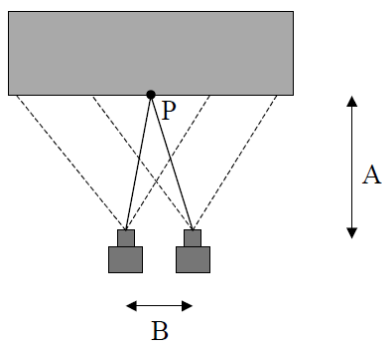


Figura 14. Posición de las cámaras paralelas. Fuente: Linder, W. (2006).

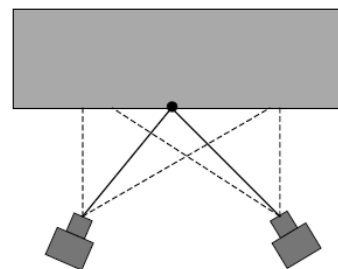


Figura 15. Posición de las cámaras convergentes. Fuente: Linder, W. (2006).

Además, las recomendaciones (Figura 16 y Figura 17) en torno a la toma de datos continúan manteniendo el sentido y la dirección de la misma: que las fotografías garanticen un solape en torno al 80% entre imágenes consecutivas, y la proporción de $\frac{1}{4}$ de distancia entre la separación entre capturas y la distancia al objeto.

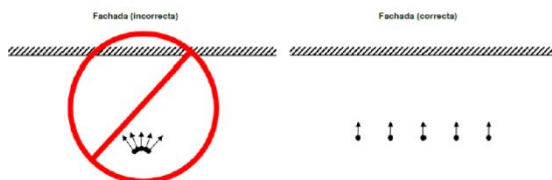


Figura 16. Recomendaciones toma exterior planar. Fuente: Agisoft (2024).

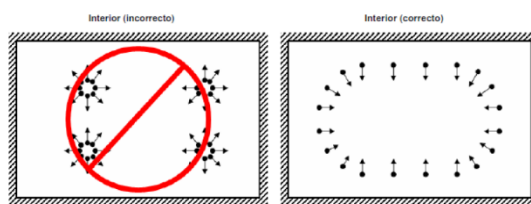


Figura 17. Recomendaciones toma interior. Fuente: Agisoft (2024).

Por un lado, la toma de datos mediante fotografía estereoscópica (Figura 18) asigna cobertura de un par de imágenes a cada zona del objeto asegurando un solape de seguridad. Cuando existe un área extendida se trabaja bajo el mismo criterio, pero con la particularidad de que la toma derecha de un par de imágenes es coincidente con la toma izquierda de la inmediatamente consecutiva.

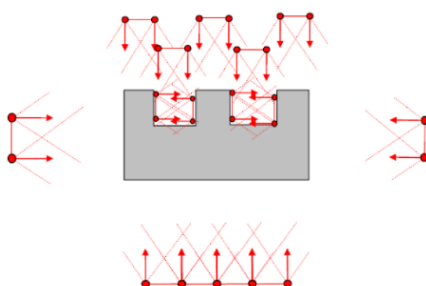


Figura 18. Toma estereoscópica. Fuente: Pérez Arias, B. (2018).

La técnica de toma de datos oblicua (Figura 19) consiste en que cada zona quede recogida en, por lo menos, tres imágenes. El solape entre estas imágenes viene determinado por una captura perpendicular al objeto y otras dos encuadrando hacia derecha e izquierda, siendo el mejor modo de captura la toma en anillo.

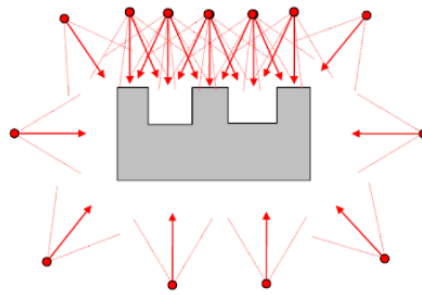


Figura 19. Toma oblicua. Fuente: Pérez Arias, B. (2018).

Aunque, teóricamente, la toma de datos estereoscópica y oblicua se diferencian entre sí y son funcionalmente independientes; en la práctica pueden combinarse (Vicente Martín, 2021). Asimismo, es recomendable realizar fotografías oblicuas en los cambios de plano y giros para favorecer una óptima alineación.

La ISPRS, en su Congreso en 1996, especificaba el inicio de la era digital. Los algoritmos alcanzan entonces la precisión subpíxel y la compresión de imagen.

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) aúna fotogrametría y teledetección bajo la misma institución. Éstas podrían llegar a fundirse y confundirse, al menos en lo que a definición respecta, tal como recoge Pérez Arias (2018): “el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”.

González Aguilera (2018) cifra la importancia de la fotogrametría en la posibilidad de implantar una red de toma de datos flexible. De este modo, se deja atrás la identificación de puntos homólogos mediante visión estereoscópica y se consigue involucrar tantas imágenes como se necesite, puesto que se parte de la identificación particular de cada una de ellas. Así, los ‘softwares’ utilizados en este proceso obtendrán un modelo 3D a partir de múltiples imágenes, de las que es fundamental conocer la orientación interna de la cámara -distorsión de las lentes, punto principal, distancia focal- y la orientación externa -posición espacial y angular de la cámara en el momento de la toma- (Vicente Martín, 2021).

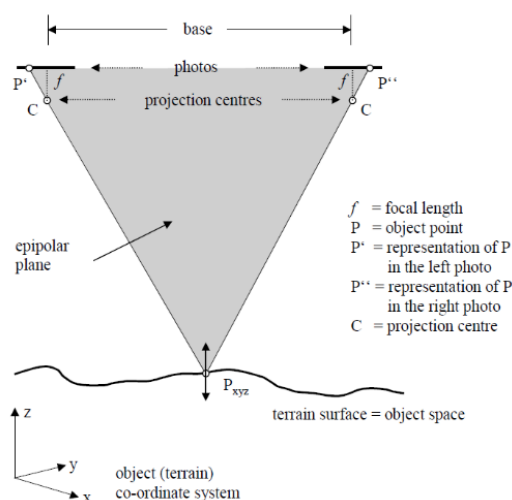


Figura 20. Geometría en un modelo estéreo orientado. Fuente: Linder, W. (2006).

Dichos 'softwares', a partir de un proceso de geometría analítica (Figura 20), consiguen la representación tridimensional deseada (Figura 21). Los grandes avances en fotogrametría surgen a partir de algoritmos de automatización de los procesos. Por tanto, la base de la fotogrametría y su fiabilidad parten del eje vertebrador de la técnica: "el uso de la imagen como fuente de información principal" junto con "la automatización del proceso de orientación y el de reconstrucción del modelo 3D" (García Gago *et al.*, 2014).

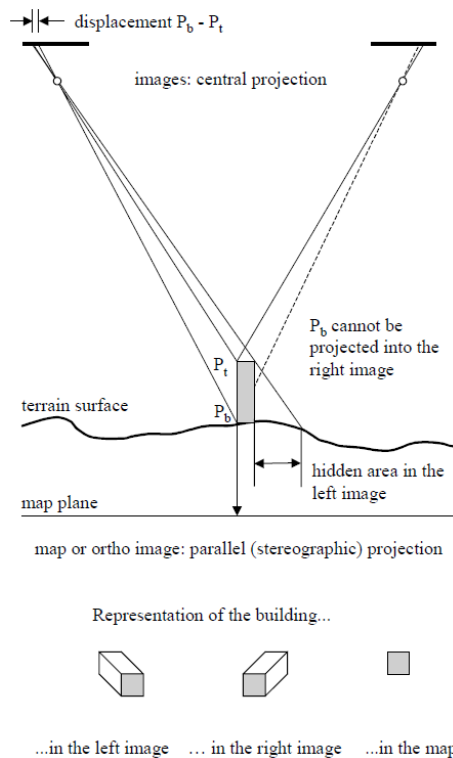


Figura 21. Proyección central y proyección paralela (estereográfica). Fuente: Linder, W. (2006).

Por otra parte, el vínculo entre fotogrametría y Patrimonio lo establece el CIPA en su X Symposium Internacional en 1988 (Almagro Gorbea, 1988). Además, asume la relación bidireccional y retroalimentada entre documentación, conservación y divulgación. Dicho comité asume que "su objetivo principal es la mejora de todos los métodos para inspeccionar monumentos y sitios culturales, especialmente por los efectos de sinergia obtenidos por la combinación de métodos bajo especial consideración de la fotogrametría con todos sus aspectos, como una contribución importante al registro y monitoreo perceptual del patrimonio cultural, a la preservación y restauración de cualquier monumento, objeto o sitio arquitectónico u otro objeto cultural valioso, como apoyo a la investigación arquitectónica, arqueológica y otras investigaciones histórico-artísticas".

La obtención de un 3D Urban Model ha sido uno de los grandes retos de la virtualización. El modo de adquisición y toma de datos 'Range Imaging' (Shiode, 2001) combina la técnica LiDAR ('Ligth Detection and Ranging') con el apoyo de tomas fotográficas para una reconstrucción 3D.

Esta tecnología mide la distancia entre un punto de emisión y un objeto mediante un láser, calculando el tiempo que tarda el láser desde que sale hasta que regresa; es decir, desde su emisión hasta la detección del pulso reflejado.

En los últimos años, el sistema LiDAR se ha consolidado como combinación e, incluso, alternativa a las técnicas fotogramétricas de levantamiento tradicionales. La evolución de la tecnología ha llevado a que se puedan crear modelos 3D a partir de una nube de puntos que, posteriormente, se puede administrar (Zouaghi, 2019). Una nube de puntos es un conjunto de puntos donde cada uno de ellos tiene su propia información de posición X, Y, Z y, a menudo, la información de color RGB ('Red', 'Green', 'Blue') (Figura 22). La combinación de ambas técnicas confiere modelos más fiables y precisos (Rottensteiner, 2003), (Rottensteiner *et al.*, 2005), (Arranz Justel, 2013), (Kwak, 2013).

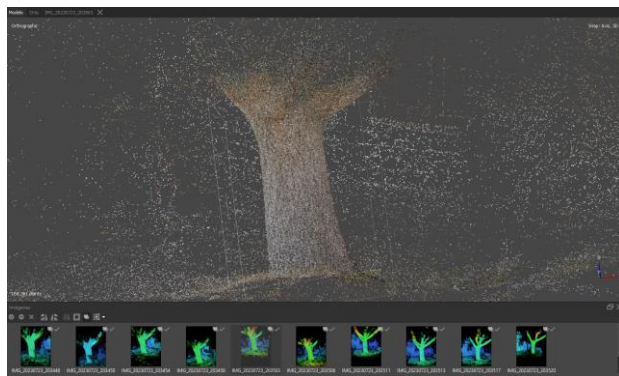


Figura 22. Nube de puntos desde vista de cámara. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Mapa de profundidad desde vista de cámara. Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de las coordenadas de la nube de puntos parte de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) diferencial y un Sistema de Navegación Inercial (INS), sabiendo la posición del sensor y el ángulo del espejo. Sin embargo, en la actualidad, la técnica fotogramétrica no necesita de la nube de puntos para obtener un modelo 3D dado que también puede realizarlo a partir de los mapas de profundidad. Un mapa de profundidad es una representación gráfica que asigna valores de profundidad a cada píxel de una imagen, indicando la distancia entre los objetos en la escena y el punto de vista de la cámara (Figura 23). Estos valores de profundidad vienen representados en una escala de color, donde la gama de tonos entre blancos (cálidos) y negros (fríos) representan la proximidad y lejanía respecto de la cámara, respectivamente. Por tanto, al no necesitar necesariamente de una nube de puntos, se ha de resolver la georreferenciación de las imágenes.

4.2. CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS EN FOTOGRAMETRÍA SUBTERRÁNEA

En sus inicios, la reconstrucción tridimensional del subsuelo se basó en datos de perforaciones, apoyado por distanciómetros, brújulas y niveles. Resultaba una tarea difícil e inexacta puesto que existen fenómenos geológicos como fallas, grietas o cavidades (Plan & Xaver, 2010).

Durante la segunda mitad del primer cuarto del siglo XXI, la fotogrametría subterránea ha estado ligada a sensores LiDAR y escáneres láser terrestres (TLS) e, incluso, a sistemas de mapeo y localización simultáneos (SLAM) (Smith & Cheeseman, 1986), vehículos aéreos no tripulados (UAV) y a técnicas SfM. Las geociencias, junto con el desarrollo de la tecnología aplicada, resuelven problemas geológicos complejos, y sus modelos resultantes ofrecen solución a la información espacial en cualquier ángulo o sección (Fonstad *et al.*, 2013), (Okay *et al.*, 2019).

Actualmente, la fotogrametría subterránea es capaz de conseguir resultados fidedignos sin sistemas de medición e información complementarios. Diversos autores y grupos de investigación han estudiado y documentado casos concretos. Sus objetivos, generalmente, partían de la necesidad de dar solución a problemas concretos. Tomando algunas de estas investigaciones como referencia y punto de partida, en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster se persiguen los mecanismos de buenas prácticas y líneas generales de actuación común.

En investigaciones sobre grandes ciudades, como Glasgow y Shanghai, Kearsley *et al.*, (2017) y Tao *et al.* (2021), respectivamente, analizaron los modelos geológicos tridimensionales subterráneos para estudiar los cimientos y condiciones hidrológicas de dichas urbes. Independientemente de los resultados de dichos estudios, el uso de la tecnología aplicada al reconocimiento de entornos subterráneos arroja beneficios en cuanto a los conocimientos físicos y mecánicos del suelo sin la necesidad de inferirlos o predecirlos.

Concretando sobre estructuras hipogénicas, existen ejemplos de levantamientos fotogramétricos, comparativos (Pukansa *et al.*, 2017) o en combinación con TLS (De Waele *et al.*, 2018), (Rodríguez-González *et al.*, 2015). También, las lentes ojo de pez se han empleado con éxito en espacios estrechos naturales (Alessadri *et al.*, 2019) y artificiales (Perfetti *et al.*, 2017). Recientemente, los sistemas de mapeo móviles portátiles (Zlot & Bosse, 2014), (Sammartano & Spanò, 2018) y una combinación de técnicas 3D (Farella *et al.*, 2016) han demostrado ser una estrategia muy efectiva para estructuras subterráneas.

Desde el Instituto de Fotogrametría y Teledetección de la Universidad de Viena y el Instituto de Geología y Paleontología de la Universidad de Innsbruck centraron el caso de estudio en Märchenhöhle, Austria (Roncat *et al.*, 2011). Pusieron el foco en la cuestión lumínica dado que el uso de levantamientos únicamente fotogramétricos en cuevas basados en imágenes resulta limitado debido a la dificultad de lograr condiciones de luz homogéneas. En este caso, se requirió el apoyo de un TLS.

Otro de los casos en los que el TLS se convierte en indispensable para las técnicas fotogramétricas es la cueva de Les Fraux en Dordoña, Francia. Sus autores, Grussenmeyer *et al.*, (2012), describen que uno de los factores determinantes para la decisión de utilizar el TLS fue la necesidad de conseguir una georreferenciación directa de la nube de puntos a partir, por ejemplo, de escáneres como Trimble GX o Leica Scan Station C10. Asimismo, la georreferenciación indirecta se emplea cuando las opciones de centrado y orientación no están disponibles en el escáner.

Investigadores de la Universidad de Ryerson, Toronto, motivados por dar respuesta a una necesidad social como era aumentar la seguridad de los trabajadores en zonas de trabajo y construcción subterráneas, desarrollaron un Sistema de Mapeo de Infraestructura Subterránea (UIMS). El UIMS fue diseñado para facilitar la rápida recopilación de datos y mapear las numerosas características de determinados servicios públicos. Los resultados de los trabajos aportaron una precisión absoluta y relativa de 0,33 m y 0,13 m, respectivamente.

El resultado fue realmente alentador, aunque el GPS perdía precisión a medida que aumentaba su profundidad en el subsuelo. “El sistema se compone de tres piezas de ‘hardware’ que incluyen una tableta, un receptor GPS y una cámara digital. El ‘software’ de este sistema emplea un diseño interno, que consiste en un algoritmo de búsqueda basado en el flujo de datos del GPS; una estimación de orientación exterior de forma cerrada para múltiples sensores; y un ajuste de haz fotogramétrico tradicional” (Tulloch *et al.*, 2006).

Jordan (2017), en su Tesis sobre el modelado de cuevas a partir de fotogrametría SfM para la Universidad de Arkansas, establece los estándares de precisión en los estudios sobre cuevas a partir del sistema jerárquico creado por la Asociación Británica de Investigación de Cuevas (BCRA), recogidos en la Tabla 1 y la Tabla 2, y se enfrenta a las cuestiones de iluminación y posicionamiento GPS.

Tabla 1. *Gradings for a cave line survey. Fuente: BCRA (2002).*

| | |
|----------------|--|
| GRADE 1 | Sketch of low accuracy where no measurements have been made. |
| GRADE 2 | May be used, if necessary, to describe a sketch that is intermediate in accuracy between Grade 1 & 3. |
| GRADE 3 | A rough magnetic survey. Horizontal & vertical angles measured to $\pm 2.5^\circ$; distances measured to ± 50 cm; station position error less than 50 cm. |
| GRADE 4 | May be used, if necessary, to describe a survey that fails to attain all the requirements of Grade 5 but is more accurate than a Grade 3 survey. |
| GRADE 5 | A Magnetic survey. Horizontal and vertical angles measured to $\pm 1^\circ$; distances should be observed and recorded to the nearest centimetre and station positions identified to less than 10 cm. |
| GRADE 6 | A magnetic survey that is more accurate than grade 5. |
| GRADE X | A survey that is based primarily on the use of a theodolite or total station instead of a compass. |

Tabla 2. *Gradings for recording cave passage detail. Fuente: BCRA (2002).*

| | |
|----------------|--|
| Class A | All passage details based on memory. |
| Class B | Passage details estimated and recorded in the cave. |
| Class C | Measurements of detail made at survey stations only. |
| Class D | Measurements of detail made at survey stations and wherever else needed to show significant changes in passage dimensions. |

Asimismo, Jordan (2017) infiere tener en cuenta la precisión relativa, que es la que se ocupa de comparar la distancia entre dos puntos reconocibles del modelo virtual y la misma distancia en el modelo real; y la precisión absoluta, que es la medida de precisión con la que se posiciona el modelo virtual respecto a su verdadera posición en el sistema de referencia absoluto.

También se puede hallar la precisión relativa a partir de la comparación de dos nubes de puntos mediante la distancia de Hausdorff, siendo ésta la distancia máxima entre cualquier punto de la primera nube de puntos y cualquier punto de la segunda nube (Huttenlocher *et al.*, 1993).

Jordan (2017) plantea un método de toma de imágenes no invasivo (Figura 24) a partir de la técnica SfM, en el que coloca una cámara GoPro Hero 3+ sobre un reflector recargable inalámbrico Husky de 1000 lúmenes junto con un iPhone 6 conectado por Wi-Fi a la GoPro. Para el caso concreto, divide la cueva en cuatro fragmentos que se procesan por separado con una media de 20 imágenes cada uno.

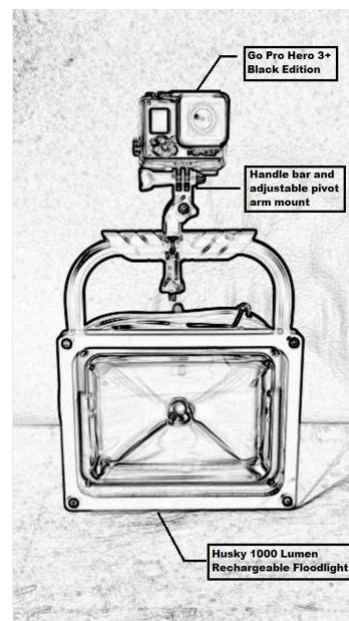


Figura 24. GoPro Survey Rig. Fuente: Jordan, J. H. (2017).

Para salvar el problema de posicionamiento GPS desarrolló dos métodos de georreferenciación subterránea. El primero consiste en tomar puntos de control en torno a la embocadura de la cueva referenciando el modelo a ellos y, el segundo, en establecer varias estaciones topográficas en el interior de la cueva a partir de una coordenada GPS externa. Según el informe generado por Agisoft PhotoScan, el error total fue de 1,2 m.

Existen, también, situaciones subterráneas en las que la técnica fotogramétrica pura es totalmente competente y autónoma como para llevar a cabo un proyecto, afianzando ventajas sobre la monitorización mediante inspección visual e instrumentación geotécnica, donde la subjetividad visual puede dar lugar a análisis incompletos o con escasos datos cuantificables. Dos de estos casos son el control del terreno en minería subterránea (Benton *et al.*, 2017) y el seguimiento en la deformación de túneles (Scaioni *et al.*, 2014).

Para controlar la deformación del túnel (Figura 25), ubicado en Parè di Valmadrera, entre las localidades de Lecco y Bellagio (Lombardía, Italia), los autores se basan en la colocación de objetivos en la sección a controlar de su bóveda. Marcan las posiciones de las cámaras para su correcta situación en controles sucesivos, logrando a partir de cuatro cámaras una precisión teórica de $\pm 0,2$ mm. Se utilizó de base la iluminación artificial del propio túnel.

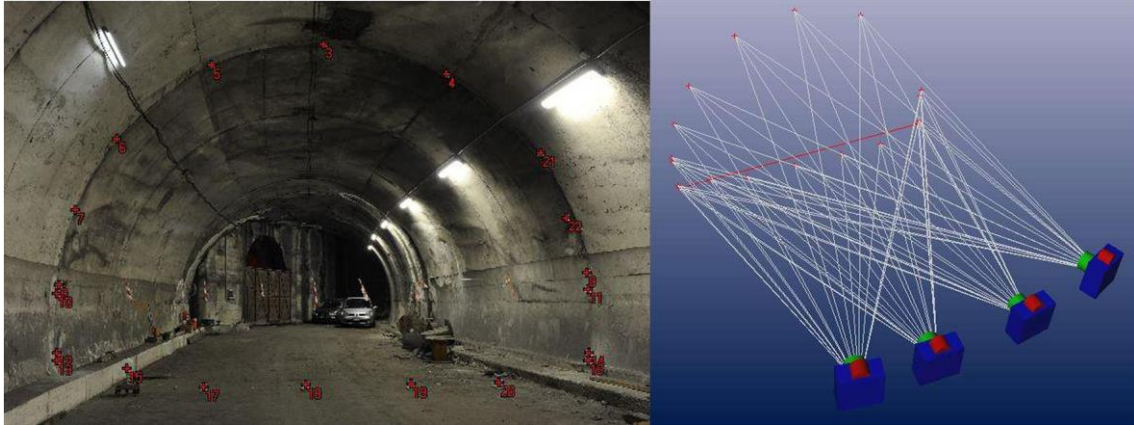


Figura 25. Ejemplo de aplicación del método fotogramétrico para medir deformaciones relativas en secciones de túneles (izquierda). Vista en 3D que muestra las poses de la cámara y las posiciones de los objetivos en 3D (puntos rojos) junto con los rayos proyectados (derecha). Fuente: Scaioni, M. et al. (2014).

El caso del control de la estructura se llevó a cabo en la rampa 54 de la mina Lucky Friday (Idaho, EEUU), donde se optó por monitorizar durante tres años las paredes de la misma, estableciendo puntos de control y las cámaras lo más cerca posible de la pared opuesta. La toma de datos parte de pares de fotografías en tres ángulos diferentes: frontal a la pared, 45° hacia arriba y 45° hacia abajo (Figura 26). La experiencia demostró que se debía tomar un par de imágenes a izquierda y derecha en cada estación, obteniendo un total de 24 fotografías en cada posición. Se utilizó iluminación artificial portátil (Figura 27). La precisión inicialmente resultó en torno a 10 mm; sin embargo, al añadir la toma de imágenes laterales, se redujo hasta 1,0 mm.

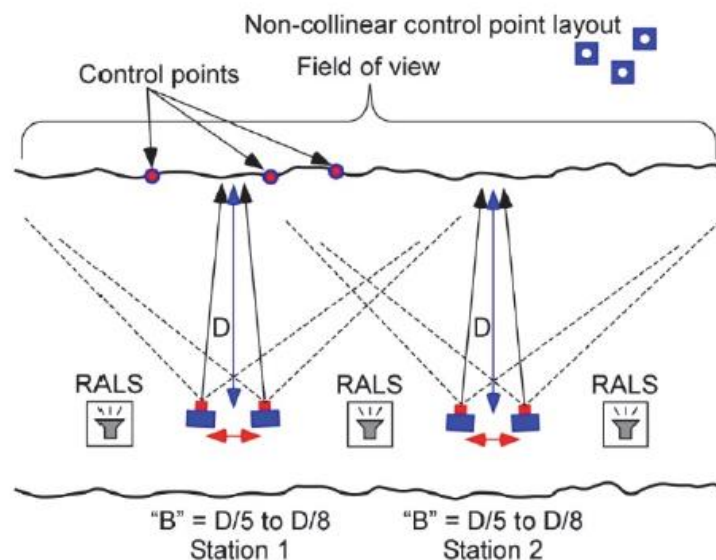


Figura 26. Vista en planta de la configuración típica para un estudio de fotogrametría estereoscópica en la mina Lucky Friday. Fuente: Benton, D. J. et al. (2017).



Figura 27. Estudio fotogramétrico realizado en la rampa 54 de la mina Lucky Friday. Fuente: Benton, D. J. et al. (2017).

Sobre estos dos casos prácticos, la técnica fotogramétrica pura ha resultado ser una herramienta efectiva en la monitorización de estructuras subterráneas, aunque no se tiene en cuenta la georreferenciación, puesto que se evalúa y compara el modelo sobre sí mismo en diferentes puntos temporales. Sin embargo, para la consecución de gemelos digitales 3D subterráneos se añade la dificultad de mantener una iluminación homogénea, un correcto posicionamiento GPS y un elevado nivel de detalle, entre otros, lo que conllevará un mayor número de imágenes y un mayor tiempo de procesado.

La empresa especializada en ‘software’ fotogramétrico Pix4D junto con Flyability, empresa especializada en UAVs Elios, realizaron un proyecto de inspección de alcantarillas a partir de fotogrametría. “Una alcantarilla, puede inspeccionarse con una solución de escaneo terrestre, como la aplicación Pix4Dcatch en un dispositivo móvil (que puede mejorarse con el rover viDoc RTK cuando está en el exterior)”. El flujo de trabajo de Flyability consistió en incorporar una jaula de 10.000 lúmenes al Elios 2 para inspeccionar los 50 metros de alcantarillado. Primeramente, se realizó un vuelo manual de reconocimiento para comprobar el nivel de residuos y obstáculos, y para verificar que la señal entre el UAV y el mando resultaba ininterrumpida. A continuación, se realizó el vuelo fotogramétrico también manual debido a la naturaleza imprevisible reducida de la cavidad a inspeccionar, realizando un total de 530 imágenes.

El Elios 2 (Figura 28) es un UAV diseñado para su uso en interiores, que permite volar en espacios reducidos sin riesgo de estrellarse dado que cuenta con una jaula de protección a la que puede acoplarse un sistema de iluminación independiente. “Elios 2 toma imágenes con una ‘Ground Sampling Distance’ (GSD) de hasta 0,18 mm / px cuando captura datos a una distancia de 30 cm” (Pix4D, 2021), (Flyability, 2021).

Recientemente, el Elios 3 mejora a su predecesor (Flyability, 2022). Reduce su tamaño y el de su jaula, aumenta el tiempo de vuelo y cuenta con 16.000 lúmenes de potencia. Proporciona un mapeado en tiempo real y gracias a los sistemas SLAM y LiDAR mejora la precisión de los resultados, además de basarse en estos sistemas para su propia estabilización.

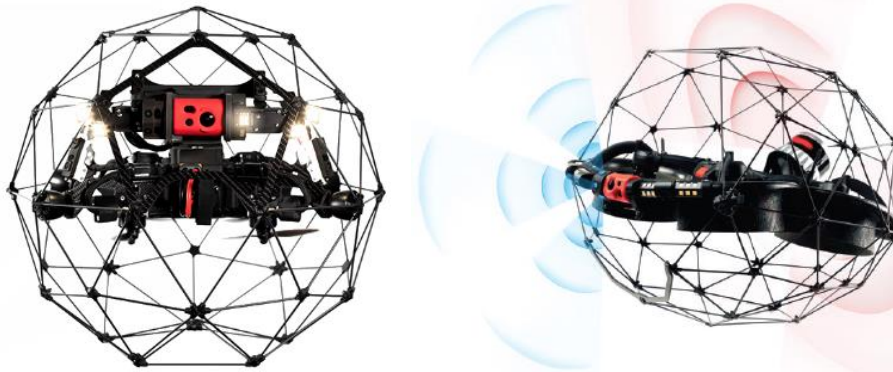


Figura 28. UAVs inspección de interiores. Elios 2, izquierda. Elios 3: sistema de estabilización, derecha.
Fuente: Flyability (2021) y Flyability (2022).

De un tiempo a esta parte, desde la incursión de la COVID-19, el turismo virtual ha cobrado especial relevancia en el mundo cultural. García Bustos *et al.*, (2023), haciéndose eco de publicaciones recientes, argumenta el auge de los recursos culturales virtualizados (Itani & Hollebeek, 2021) propiciado por la consolidación del turismo virtual (Talwar *et al.*, 2022), (Verma *et al.*, 2022) e inmersivo (Cardozo & Papadopoulos, 2021), (Zhang *et al.*, 2022). Aunque, todavía, las oportunidades tecnológicas no están al alcance de la mayoría o el usuario carece de experiencia para saber utilizarla.

Su proyecto busca musealizar virtualmente el arte paleolítico franco-cantábrico; desde la cueva al visor online. Realizan “la digitalización de la morfología de muros pintados y grabados para comprender la relación figura-superficie”, buscando reconocer “volúmenes, trazos y formas para detectar relaciones sincrónicas o diacrónicas entre las propias representaciones” (García Bustos *et al.*, 2023). La captura de datos se solventó mediante fotogrametría de corto alcance teniendo en cuenta el fin a virtualizar, su acceso, el equipamiento material y humano y la técnica de captura (Figura 29). Las fotografías se realizaron con un foco de apoyo manual y linterna frontal. El flujo de trabajo fue el que se muestra en la Figura 30.



Figura 29. Toma de datos fotogramétricos con foco de apoyo manual. Fuente: García Bustos *et al.*, (2023).

La finalidad consiste en obtener un proyecto educativo y divulgativo de calidad para acercar al público el patrimonio de forma accesible, inclusiva y alternativa (Figura 31).

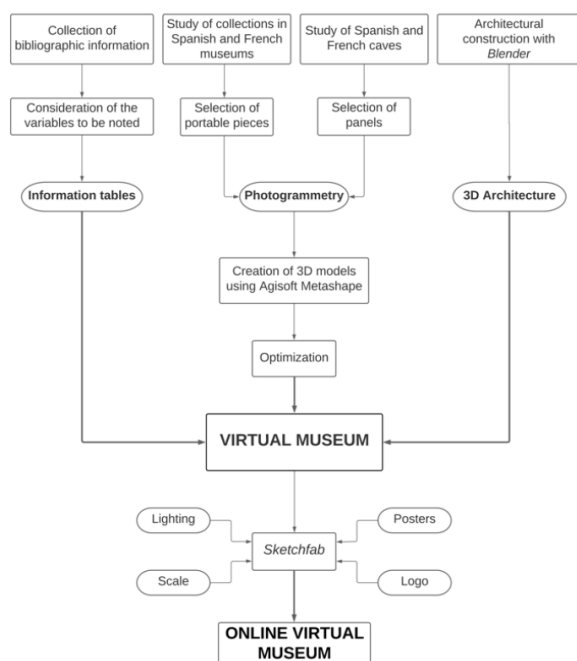


Figura 31. Arquitectura del museo virtual construido. Fuente: García Bustos et al., (2023).

Figura 30. Esquema de la metodología aplicada. Fuente: García Bustos et al., (2023).

Uno de los casos actuales sobre virtualización subterránea fue publicado en enero de 2024 por la revista académica *Virtual Archaeology Review*, tratando el diseño y el desarrollo virtual de la cueva de Petralona (Grecia), utilizando tecnologías 3D (Karkazi et al., 2024). La cueva cuenta en sus proximidades con un museo.

La misión de dicho proyecto consiste en la puesta en valor del museo en relación al bien patrimonial con unos objetivos concretos, como facilitar la comprensión y apreciación de lugar, y comunicar su importancia estimulando el interés a partir de experiencias de aprendizaje y exploración. Además, resuelve el problema de accesibilidad e inclusividad para todos los públicos desarrollando un programa de museo virtual.

Todo ello contribuye a la conservación sostenible del entorno patrimonial pasando por su reconocimiento y su difusión, buscando que el proyecto tenga la repercusión necesaria para sensibilizar sobre la protección de cuevas y sus ecosistemas a través de las nuevas posibilidades de interacción con el bien.

El proceso de virtualización busca conseguir la representación de un gemelo digital fidedigno en volumen y texturas para incorporar su experiencia inmersiva. Se realizan 140 puntos de escaneado apoyado con 6.000 fotografías. En el exterior se utiliza un UAV que realiza dos vuelos: uno a 110 m de altura para obtener el modelo digital del terreno y otra a 35 m para enlazar el interior de la cueva con su entorno exterior. Las características de 'hardware' utilizado son las mostradas en la Figura 32.

| <i>Equipment</i> | <i>ARTEC</i> | <i>FARO</i> | <i>Hasselblad</i> | <i>DJI</i> |
|------------------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|
| <i>Model</i> | EVA | FOCUS 3D S120 | X1 D II | Phantom 4 RTK |
| <i>Technology</i> | White Light | Laser | Digital Camera | UAV |
| <i>Type</i> | Handheld | Terrestrial | Handheld | Drone |
| <i>Accuracy / Resolution</i> | 0.1 – 0.5 mm | 2.0 – 4.0 mm | 8272 x 6200 | 5472 x 3648 |
| <i>Texture</i> | YES | YES | YES | YES |
| <i>Tex. Resolution</i> | 1.3 mp | 70 mp | 50 mp | 20 mp |
| <i>Frame Rate</i> | 60 fps | - | 25 fps | 60 fps |
| <i>Weight</i> | 0.90 kg | 5.00 kg | 0.76 kg | 1.31 kg |
| <i>Main Export</i> | STL, OBJ | E57, XYZ | JPEG, TIFF | JPEG, MP4 |
| <i>Working Distance</i> | 0.4 m – 1 m | 0.6 m – 120 m | Dep. On Lens | 0.7 m – 30 m |

Figura 32. Especificaciones del equipo. Fuente. Karkazi, E. et al. (2024).

El proceso de digitalización subterráneo se realizó mediante un escáner láser con un dispositivo de iluminación LED (*'Light Emitting Diode'*) integrado (Figura 33) y mediante la técnica de toma fotográfica manual en combinación con iluminación estroboscópica artificial (iluminación mediante destellos,

Figura 34) por medio de 4 flashes de estudio y 4 portátiles, sincronizados en remoto con la cámara. Esta técnica combinada adaptada al caso concreto es la puesta en práctica de la propuesta de combinación escáner láser, fotogrametría manual terrestre y aérea (Tokmakidis et al., 2014).



Figura 33. Escáner láser 3D terrestre con iluminación LED integrada. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024).



Figura 34. Aplicación de la técnica de rebote. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024).

Aunque este caso no trata de resolver el problema de georreferenciación, sí aporta las claves para integrar la fotogrametría manual subterránea con el escáner láser a partir de los *'Ground Control Points'* (GCP) de cada escaneo y, todo ello, a su vez, con la fotogrametría aérea (Figura 35) referenciada a las coordenadas GPS obtenidas por el Phantom 4 RTK. Este proyecto muestra una vía de exploración hacia la georreferenciación subterránea a partir del enlace fotogramétrico del interior (Figura 36) con su entorno (Figura 37), apoyando la fiabilidad de los resultados en la técnica de toma de datos, la correcta iluminación artificial y el solape fotogramétrico manual con el terrestre.



Figura 35. Toma de datos aérea. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024).

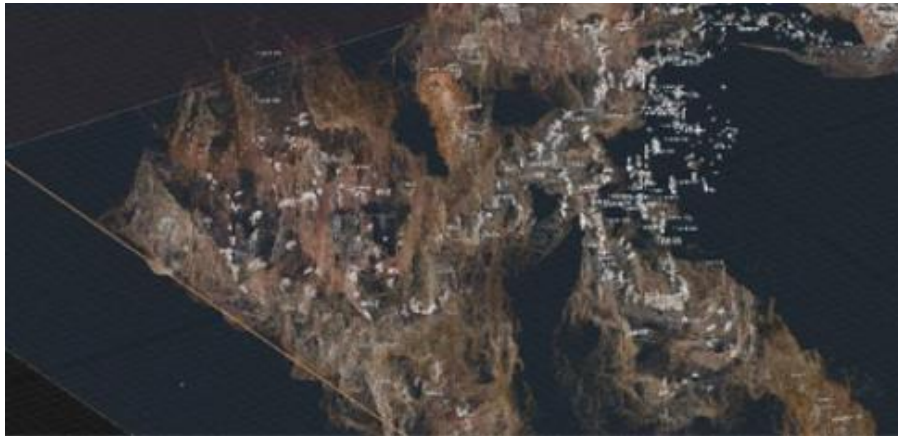


Figura 36. Nube de puntos, vista interior. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024).



Figura 37. Nube de puntos, vista exterior. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024).

5. CONSIDERACIONES EN EL FLUJO METODOLÓGICO

5.1. CAPTURA DE DATOS EN ENTORNOS SUBTERRÁNEOS Y CONDICIONES LUMÍNICAS ADVERSAS

5.1.1. PROBLEMAS

La fotogrametría subterránea se enfrenta a una serie de desafíos únicos, dado que la captura de datos es el factor fundamental y diferencial de todo el proceso y, en consecuencia, de los resultados. Este proyecto se centrará en conocer los puntos que afectan a la calidad y la precisión de estos resultados. Los obstáculos generales en fotogrametría subterránea son:

A. La ausencia de luz natural

La escasez de luz natural o artificial dificulta la captura de imágenes de alta calidad y afecta a la visibilidad del entorno. La limitada disponibilidad de luz natural influye significativamente en la calidad de las imágenes capturadas. Los entornos subterráneos suelen carecer de fuentes de iluminación adecuadas, lo que puede resultar en imágenes subexpuestas, con sombras pronunciadas y detalles oscuros, complicando la reconstrucción tridimensional precisa. Las sombras y los reflejos causados por la falta de luz apropiada distorsionan las imágenes y dificultan la interpretación de datos fotogramétricos.

B. Las características inherentes a las estructuras hipogéicas

Las irregularidades geomorfológicas, las restricciones de espacio, la dificultad de accesibilidad y la presencia de obstáculos complican la captura de imágenes desde ángulos óptimos. Esto puede obstaculizar la visión de ciertas áreas, limitando la cobertura fotográfica y generando lagunas en el modelo final. Asimismo, la estrechez de los pasajes subterráneos también representa un desafío logístico para la colocación estratégica de la cámara, ya que puede ser difícil encontrar ubicaciones ideales para garantizar una superposición adecuada entre las imágenes. También el acceso limitado y las condiciones adversas de trabajo pueden dificultar la movilidad del personal, añadiendo complejidad al proceso de captura de datos.

Las características del pavimento son otro factor a considerar, pues conllevan el uso de cámaras portátiles o sobre vehículos, teniendo en cuenta que éstos introducirán vibraciones o movimientos no deseados que afectarán a la captura de imágenes. Además, el polvo y las partículas en suspensión en el aire reducen la aptitud de las imágenes y, en consecuencia, la del modelo fotogramétrico.

C. La georreferenciación

La falta de características distintivas o puntos de referencia dificultan la georreferenciación precisa de las imágenes y su posterior alineado. La georreferenciación del modelo 3D en proyectos de fotogrametría subterránea es compleja por la falta de puntos de referencia geoespaciales y la ausencia de señales de GPS, debido a la obstrucción de la señal por el suelo y la roca.

Esta situación requiere el uso de sistemas de posicionamiento alternativos como estaciones totales, sistemas de medición inercial (IMU) o tecnologías de localización subterránea específicas, por ejemplo, sistemas de navegación por láser o sistemas de posicionamiento subterráneo (SPS).

5.1.2. SOLUCIONES

La fotogrametría subterránea requiere un enfoque cuidadoso y adaptado a las condiciones específicas de los entornos subterráneos, con soluciones creativas para superar las limitaciones de iluminación, visibilidad, acceso y posicionamiento a fin de obtener datos rigurosos y fidedignos para la generación de modelos tridimensionales precisos. Incluso, en ocasiones, la necesidad de recopilar y procesar datos en tiempo real requiere soluciones y sistemas específicos adaptados a las condiciones del entorno.

A. Sensores de imagen, cámaras e iluminación

En lo que respecta a la fotogrametría en escasas condiciones lumínicas, es necesario utilizar cámaras de alta resolución y sensores de imagen de alta sensibilidad para capturar todos los detalles posibles.

Una de las técnicas para la captura de imágenes en estas condiciones es la denominada '*High Dynamic Range*' (HDR) (Santos Nascimento *et al.*, 2024), posibilitando mejoras en el rango dinámico de la luminancia, es decir, consiguiendo interpretar mejor la superficie fotografiada a partir de la intensidad luminosa o cantidad de luz que es capaz de proyectar dicha superficie (Pistellato *et al.*, 2023), (Martín Rodríguez, 2014). El '*bracketing*' de exposición podría resultar otra alternativa a partir de la toma de una misma imagen en diferentes condiciones de flash, luz y enfoque (Roberts, 2004), aunque habría que valorar la calidad de los resultados en detrimento del excesivo consumo de tiempo de la toma de datos.

Otra consideración importante es el uso de un ISO (*Internacional Organization for Standardization*) elevado. Aumentar la sensibilidad ISO de la cámara ayuda a capturar con más luz la imagen, aunque introduciendo ruido en la misma. Resulta imprescindible equilibrar la sensibilidad ISO con la calidad deseada. Los avances tecnológicos posibilitan la utilización de lentes rápidas, con gran apertura (f/2.8 y superior), permitiendo también una mayor entrada de luz al sensor de la cámara.

Todo ello conlleva la necesidad de estabilización de la cámara para obtener imágenes nítidas y no borrosas. La mejor solución sería acompañar la captura con el uso del trípode o equipos de estabilización de la cámara para conseguir un disparo estable. Las condiciones subterráneas de cada caso concreto dictaminarán su posibilidad de uso.

Además, en fotogrametría subterránea es indispensable utilizar fuentes de luz artificial portátiles que ayuden a mejorar la visibilidad, reducir las sombras y minimizar el ruido en las imágenes. Para ello, resulta fundamental controlar la dirección y la intensidad de esta luz.

La técnica de iluminación a emplear vendrá condicionada por el entorno y será interpretada por el técnico que realice las imágenes, dejando a su criterio su adaptación para las necesidades específicas del proyecto (Figura 38), (Begleiter, 2014).

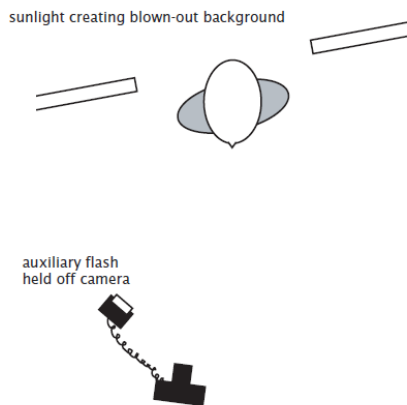


Figura 38. Cámara con flash auxiliar. Fuente: Begleiter, S. H. (2014).

La técnica de iluminación difusa utiliza paneles para proporcionar una iluminación suave y uniforme en áreas amplias manteniendo las sombras constantes. Sin embargo, la iluminación direccional utiliza focos para iluminar áreas específicas, permitiendo controlar la dirección y la intensidad de la luz, y minimizando sombras no deseadas. Por otra parte, la iluminación lateral aplica fuentes de luz en ángulo, mejorando la percepción de la profundidad y la textura en detrimento de los niveles de sombra.

En ocasiones, se necesita una fuente de luz únicamente en una zona concreta o con intensidad diferente a la general; esto se conoce como iluminación de relleno, y ayuda a mejorar la iluminación en zonas subexpuestas equilibrando la exposición y el rango dinámico de la imagen. El uso de múltiples fuentes de luz en diferentes ángulos y posiciones resultará una combinación de las técnicas anteriores. Ésta permitirá una iluminación más uniforme y completa en toda la escena, aunque es una solución más técnica y compleja de ejecutar, tanto técnicamente como en cuestión del equipo necesario.

En todo caso, las técnicas de postproceso de imágenes resultarán cruciales.

B. Técnica de captura de datos, solape y continuidad

La captura y representación en papel de la situación y dimensiones de ríos, montañas o carreteras son los pasos iniciales hacia la cartografía moderna. La aparición de cámaras de fotos y de vídeo ha dado lugar a los Sistemas de Mapeo Móvil (MMS), a los que la evolución tecnológica ha dotado con sensores de posicionamiento y de LiDAR. Para el correcto funcionamiento de los MMS se necesitan unas condiciones óptimas de calibración y sincronización de los componentes del equipo, ya que de ellos dependerá la calidad, rapidez y precisión de los resultados.

La técnica de captura de datos fotogramétrica en entornos subterráneos y en escasas condiciones lumínicas se basa en la misma premisa que rige los MMS. Esta base es la continuidad y el solape constante de los datos recogidos (Figura 39), bien sea desde una solución fotogramétrica o videogramétrica, que aporta consistencia e ininterrupción a los resultados.

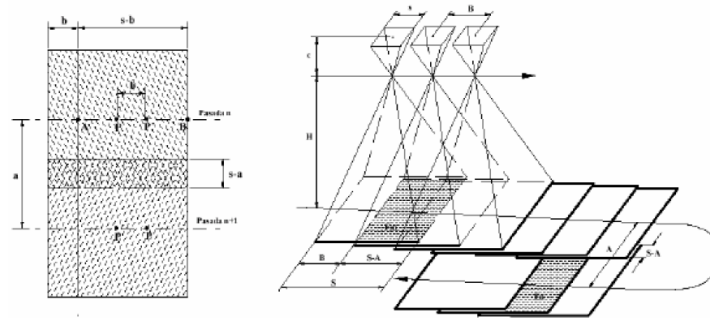


Figura 39. Disposición ideal de fotografías en vuelo. Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001).

Analizando cronológicamente la evolución de los MMS, en la década de 1970 se comenzó la inspección de carreteras pavimentadas por empresas de transporte mediante el registro fotográfico. El ejemplo más significativo es el sistema PASCO Roadrecon, que basaba su método en la grabación de manera ininterrumpida de la vía. Posteriormente, este método fue adoptado por la Federal Highway Administration de EEUU, pero la revisión de los datos que realiza requiere una gran inversión de tiempo (McGhee, 2004). Poco después nació el sistema de registro por vuelo, que contaba con una única cámara que, junto con el GPS, disminuyó el tiempo de procesado, aunque la resolución de las imágenes seguía siendo escasa (Tao, 2000).

Finalizando la década de 1980, El-Sheimy comenzó sus investigaciones sobre un sistema móvil de inventariado de vías asfaltadas. Su innovación fue añadir al vídeo la opción de giroscopio, acelerómetro y odómetro para conocer la ubicación y orientación del vehículo; utilizando, además, un sistema inercial 'strapdown' para mejorar la precisión de la orientación de la cámara.

Durante los años noventa emergieron centros de investigación referentes al MMS, uno de los más relevantes es el Departamento de Ingeniería Geomática de la Universidad de Calgary (*'Department of Geomatics Engineering, Calgary University, Canada'*). En sus estudios añadieron más videocámaras al proceso de recolección de información y las imágenes recogidas se utilizaron para el proceso de medición. Todavía aquí se recogían y digitalizaban los datos de forma manual, lo cual seguía resultando un proceso lento.

Más avanzada la década de 1990, la Universidad de Calgary confeccionó un sistema llamado *'Video Inertial Satellite'* (VISAT, Figura 40); formado por un GPS, una cámara VHS (*'Video Home System'*), ocho cámaras, un sistema inercial 'strapdown' y una unidad de control de imagen para conseguir fotografías en blanco y negro georreferenciadas hasta a 60 km/h con una gran precisión para puntos en un rango de acción menor de 35 m (El-Sheimy, 1996), (Tao et al., 2001).

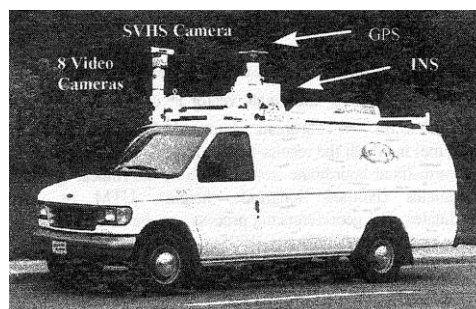


Figura 40. The VISAT system (Video Inertial Satellite). Fuente: El-Sheimy, N. (1996).

A principios del siglo XXI, desde el Instituto Cartográfico de Cataluña se creó “Geovan”, un proyecto MMS. Su característica principal es que consigue ensamblar dos subsistemas. El primero, la adquisición de imágenes gracias a dos cámaras digitales de 1024 x 1024 píxeles, para conseguir un solape entre las propias imágenes. El segundo consistía en la orientación de la referencia absoluta, temporal y geométrica de las fotografías gracias a Applanix, un IMU conjugado con dos antenas GPS para la medición correcta del acimut, además de estar dotado de un sistema de ‘hardware’ y ‘software’ y de una plataforma física para mitigar las vibraciones. Se consiguió crear un sistema basado en la estereoscopía para la reconstrucción tridimensional de edificios gracias a un vehículo en movimiento (Talaya *et al.*, 2004).

Applanix, entre otros, cambió la forma de mapear gracias a su Sistema de Navegación Inercial, pues era lo suficientemente pequeño y a la vez lo suficientemente preciso como para permitir una georreferenciación fiable.

Con la entrada de la segunda década del siglo XXI y en los últimos tiempos gracias al vertiginoso avance de la tecnología, existen grandes compañías a nivel mundial que han ido adaptándose a la cartografía móvil utilizando cámaras de alta resolución con visión esférica, tecnología LiDAR y receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) con precisión milimétrica (Tao, 2000), (Puente *et al.*, 2013).

Existen tres tipos de MMS: el terrestre (*landbased*), el aerotransportado (*airborne*, UAV) y el tipo mochila (*Backpack Mobile Mapping*). El de tipo terrestre es el que permite su desplazamiento sobre carreteras y otras vías gracias a una plataforma física instalada en un vehículo que le ofrece soporte necesario para su movimiento de forma ágil, consiguiendo la adquisición de información precisa y georreferenciada.

Los MMS de tipo aéreo son los que más cambios, variaciones y avances tecnológicos han experimentado desde su aparición. Al principio, se necesitaban varios vuelos para cubrir una zona concreta, vuelos que realizaban avionetas o helicópteros; pero desde la aparición de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y su inclusión en las posibilidades militares, esta tecnología sufrió un gran avance debido a la inversión económica que facilitaba su desarrollo para labores de espionaje, entrenamientos y fines de guerra. Por este motivo, se fueron creando dispositivos más ligeros y pequeños, integrándoles sensores de posición y navegación y escáneres láser de modo compacto y funcional (Colomina & Molina, 2014).

En los MMS de tipo aéreo se han tenido en cuenta los siguientes parámetros (Figura 41): f: focal, r: recubrimiento, h: altura de vuelo, c: cobertura del terreno, C: cobertura estereoscópica, y B: distancia entre dos imágenes.

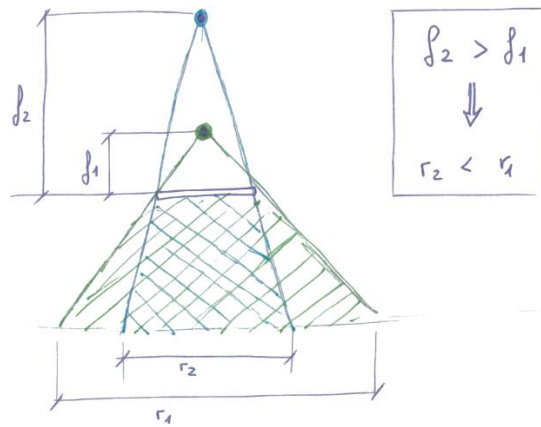


Figura 41. Área de recubrimiento en función de la distancia focal. Fuente: Elaboración propia.

Si se aumenta la distancia focal disminuirá el área de recubrimiento. Sin embargo, manteniendo la calibración constante, a mayor altura de vuelo mayor será la cobertura del terreno abarcada (Figura 42).

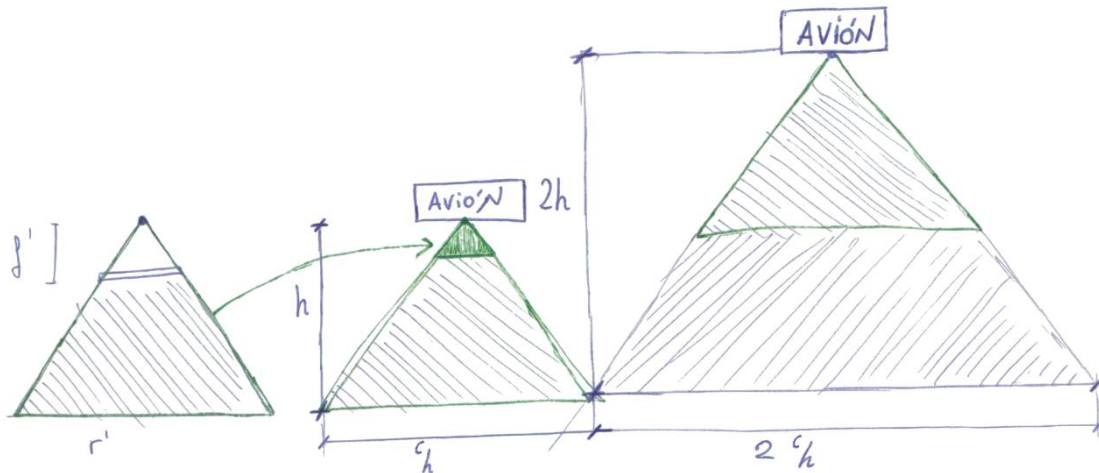


Figura 42. Cobertura del terreno en función de la altura de vuelo. Fuente: Elaboración propia.

Si se aplican estos conceptos a la captura sucesiva de imágenes en vuelo se puede determinar que la cobertura estereoscópica aumentará al aumentar la altura de vuelo y al disminuir la distancia focal (Figura 43). Mediante estas directrices se pueden controlar la continuidad y el porcentaje de solape de las imágenes.

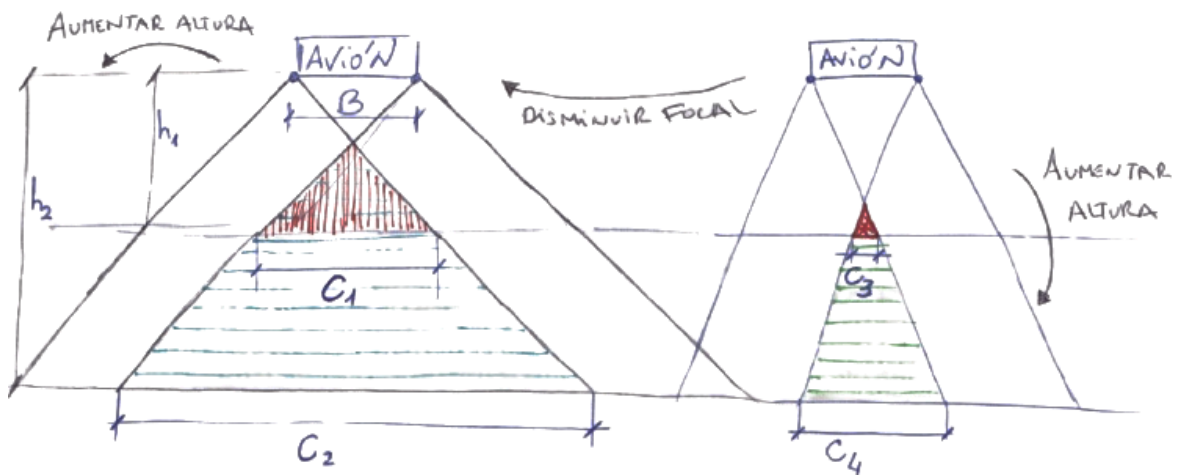


Figura 43. Cobertura estereoscópica en función de la altura de vuelo y la distancia focal. Fuente: Elaboración propia.

Por último, los 'backpack mobile mapping', son la solución de integración conjunta entre el desarrollo tecnológico, la ligereza de los sistemas aéreos y la versatilidad de su uso terrestre a nivel del ojo humano.

C. Sistema de georreferenciación

Mark Ehle, en julio de 1901, describió en su libro *Mines and Minerals* cómo trasladar coordenadas desde el exterior al interior de una cavidad subterránea a partir de una técnica topográfica que combina telescopio, cuerdas y plomadas. Estos métodos consisten en el sistema de cuerda simple (Figura 44) o doble (Figura 45), en función de la particularidad del caso.

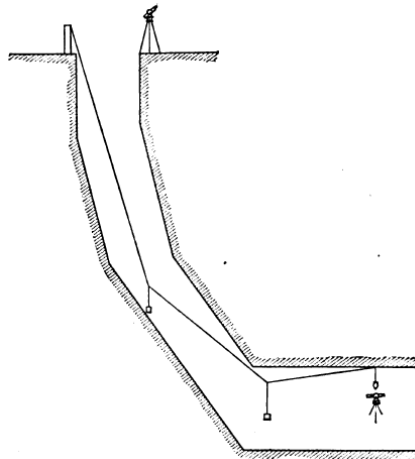


Figura 44. Sistema de cuerda simple. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

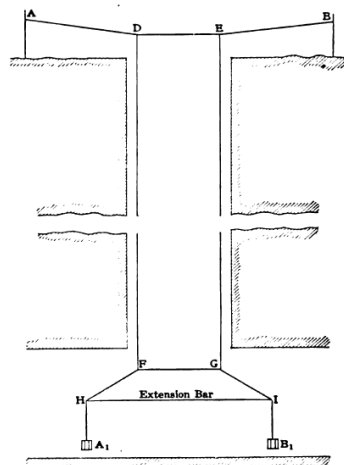


Figura 45. Sistema de cuerda doble. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

Trumbull (1908), ingeniero de minas, exprofesor de minería en la Universidad de Wyoming y exinspector de minerales de EEUU en Colorado, redactó *A Manual of Underground Surveying*, abordando las técnicas y principios de la topografía subterránea. En este libro amplió los temas de instrumentación necesaria, métodos de medición y cartografía en entornos subterráneos. Destacó cómo realizar levantamientos precisos en minas, túneles y estructuras subterráneas incluyendo el uso de brújulas, teodolitos y otros instrumentos de la época (Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50 y Figura 51).

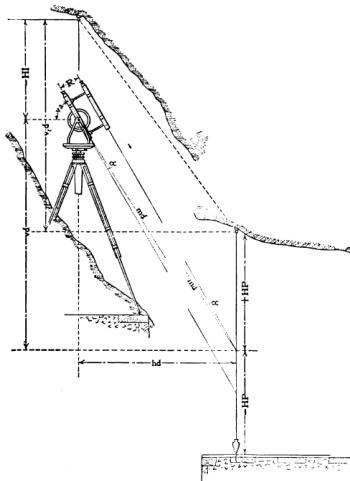


Figura 46. Telescopio superior, elevación.
Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

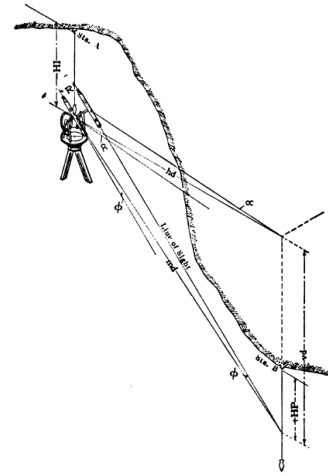


Figura 47. Telescopio lateral, proyección isométrica.
Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

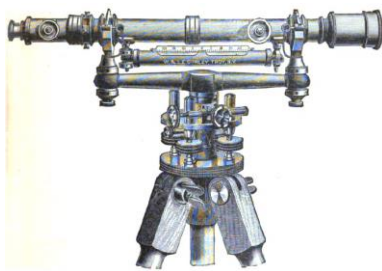


Figura 48. Nivel de estrella. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

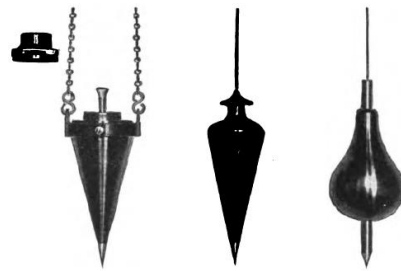


Figura 49. Tipos de plomada. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).



Figura 50. Telescopio. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

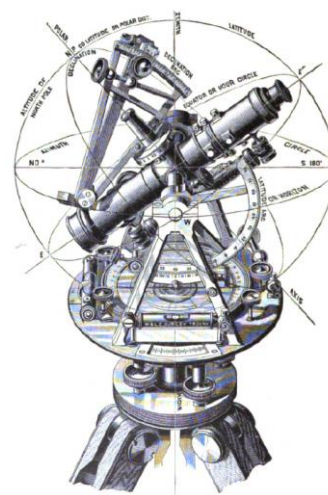


Figura 51. Telescopio solar. Fuente: Trumbull, L. W. (1908).

En la actualidad, las técnicas topográficas para la georreferenciación del interior de cuevas o túneles mantienen la misma base teórica, aunque se apoyan en los avances tecnológicos y en sistemas e instrumentos de medición más novedosos y precisos.

García Martín (2011), en sus apuntes sobre Topografía Minera en la Universidad Politécnica de Cartagena, explica cómo “los levantamientos de exterior se enlazan con la red geodésica a partir de vértices geodésicos mediante coordenadas geográficas y UTM” donde la topografía de interior “debe ir referida al mismo sistema empleado en el levantamiento de superficie”.

Expone los métodos de radiación para planimetría y nivelación geométrica, trigonometría para altimetría y la transmisión de la orientación, transmitida de modo directo cuando existen en el interior dos puntos visibles entre sí con coordenadas conocidas o el acimut de su alineación.

El enlace del interior con el exterior a partir de coordenadas necesita de un punto interior conocido a partir del cual realizar el resto del levantamiento. Esta comunicación puede darse mediante rampa (Figura 52), por pozo vertical o la combinación de ambos (Figura 53). En el primer caso, es conveniente realizar un itinerario cerrado, donde la altitud de los puntos interiores se calcula por nivelación geométrica.

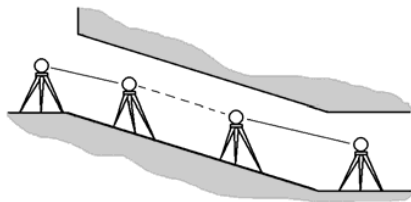


Figura 52. Comunicación por rampa. Fuente: García Martín, A. (2011).

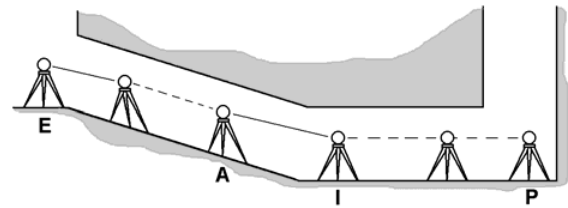


Figura 53. Comunicación por pozo y rampa. Fuente: García Martín, A. (2011).

El caso de comunicación vertical con el interior se apoya en el uso de plomadas y distanciómetros para establecer las coordenadas de la estación en el interior. Y si la combinación de ambas situaciones es posible permitirá la comprobación de coordenadas y la transmisión de la orientación, factor clave para el correcto desarrollo del trabajo.

Su dificultad se atañe a las posibilidades de comunicación del interior con el exterior. Cualquiera de los casos citados anteriormente podría definirse como orientación mediante itinerario enlazado.

La transmisión de la orientación por métodos magnéticos basa su principio en el uso de una aguja imantada que, aunque mide rumbos, no mide acimutes y su precisión es limitada. En este caso habrá que “determinar la declinación magnética para poder transformar en acimutes los rumbos” que se hayan calculado teniendo en cuenta que “la declinación varía con el tiempo y con el lugar de medición, por lo que debe calcularse en la zona y en el momento en que se vayan a realizar las mediciones de interior” (García Martín, 2011).

El uso de métodos ópticos podrá realizarse desde el exterior o el interior mediante un teodolito (Figura 54), taquímetro o estación total, mediante anteojos cenit-nadir (Figura 55) y mediante equipos láser. En la primera opción “el hilo debe quedar contenido en un plano vertical descrito por el eje de colimación, que es el mismo plano vertical que contiene a la alineación exterior” y, en la segunda, “el instrumento debe ser capaz de lanzar visuales al cenit” (García Martín, 2011), resultando un método meramente recomendable para pozos de boca ancha y escasa profundidad. El sistema de anteojos cenit-nadir tiene mayor precisión que el anterior, pero a partir de profundidades superiores a 200 m la refracción atmosférica incrementa el error. El equipo láser cuenta con la ventaja de que su haz de luz láser es visible al proyectarse.

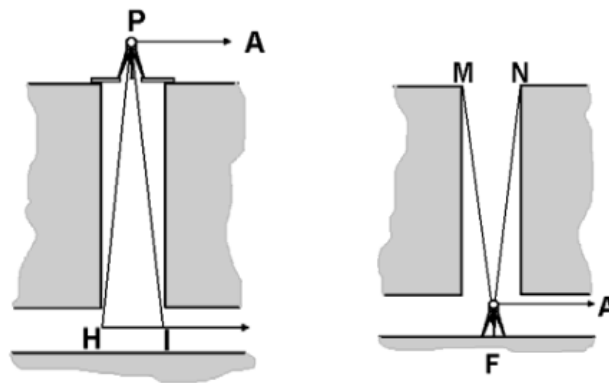


Figura 54. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por métodos ópticos desde exterior (izquierda) y desde el interior (derecha). Fuente: García Martín, A. (2011).

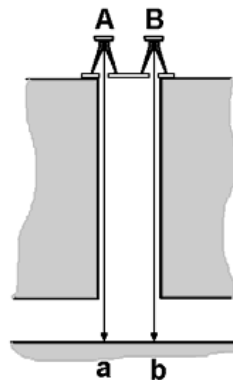


Figura 55. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por el método de anteojos cenit-nadir. Fuente: García Martín, A. (2011).

Por último, la transmisión de la orientación por métodos mecánicos se basa en el empleo de plomadas a lo largo del pozo, bien por método directo o por trigonometría (Figura 56).

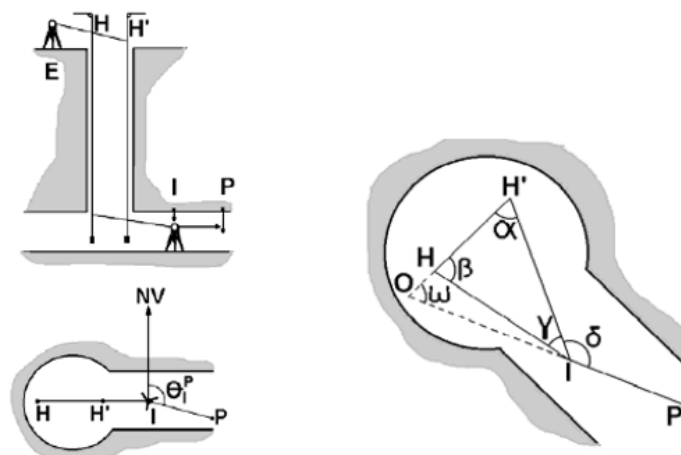


Figura 56. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por método directo (izquierda) y por trigonometría (derecha). Fuente: García Martín, A. (2011).

En nuestro caso concreto, aplicando las teorías y técnicas topográficas descritas, la fotogrametría en general y la fotogrametría subterránea en particular buscan dar solución al problema de georreferenciación a partir del desarrollo tecnológico y la combinación de técnicas. La evolución tecnológica conlleva la minimización del 'software' utilizado en estas técnicas, lo cual permite la incorporación de sistemas de posicionamiento y navegación en UAVs y en 'Backpack Mobile Mapping' (BMM).

Por regla general, los GNSS son el componente más extendido en los sensores de posicionamiento y navegación para los MMS. Pero dadas las interrupciones que pueden surgir a causa de árboles, edificios, túneles o cavidades subterráneas, es necesario su funcionamiento en correlación con los IMU para su correcto rendimiento sin lagunas de datos.

El sensor de posicionamiento que mejor resultado da es el GPS en combinación con el IMU, aunque hay estudios que refieren que la relación de coste respecto a la precisión en la inclusión de un IMU en un MMS no resulta rentable (Ellum & El-Sheimy, 2000).

Por otro lado, los sensores de actitud y rumbo (AHRS, 'Attitude and Heading Reference System') no cuentan con el desarrollo necesario para ofrecer la solución más económica. Por ello, surge la necesidad de incorporar una combinación de sensores para mitigar los errores, aunque el precio se dispare. Una solución puede ser la combinación entre GPS e IMU, con una doble antena GPS, con sensores de inclinación de alta o baja precisión e incluso con la aparición de magnetómetros. El mayor inconveniente de combinarlo con IMU es económico, además de que su peso excedería al recomendable y el consumo de batería es bastante alto; aun así, proporciona errores mínimos conocidos y sirve de enlace con las interrupciones en el GPS.

Otro problema del sistema de mapeo portátil es que está incorporado a un ente en movimiento que tendrá una dirección e inclinación cambiante a lo largo del trayecto, entrando en juego los inclinómetros. Estos sensores utilizan un líquido electrolítico en su interior para conocer la inclinación, o sistemas micro electromecánicos (MEMS) de acelerómetros.

En ambos casos calculan los ángulos de balanceo y cabeceo detectando el movimiento del ente en movimiento. Los sensores magnéticos son la solución económica para determinar las inclinaciones y el acimut. En líneas generales, funcionan como una brújula, pero su exactitud depende de la temperatura y de la presencia de material ferroso en las inmediaciones del entorno, además de ser vulnerable y alterable en campos magnéticos y eléctricos.

Toda esta tecnología va incorporada al MMS. En la Figura 57 se observa la configuración simple de un sistema primario.



Figura 57. Configuración simple de un sistema primario Backpack MMS. Fuente: Ellum, C. M., & El-Sheimy, N. (2001).

Respecto a los BMM, existen dos grandes subgrupos diferenciados principalmente por sus prestaciones: los sistemas de medición y los de solo imagen. Los sistemas de medición son aquellos a partir de los cuales se pueden obtener mediciones y resultados 3D directamente sin necesidad de exportarlos para un procesamiento adicional. Y los sistemas de solo imagen son aquellos en los que los datos exportados consisten en un registro de datos fotográficos para su posterior procesamiento. Un ejemplo de registro solo por imagen es Google Trekker como capturador de imágenes inmersivas para su función en Streetview. Dos de los modelos comerciales más reconocidos con sistema de medición son Ultracam Panther de Microsoft (Figura 58 y Figura 59) y Pegasus de Leica Geosystems.

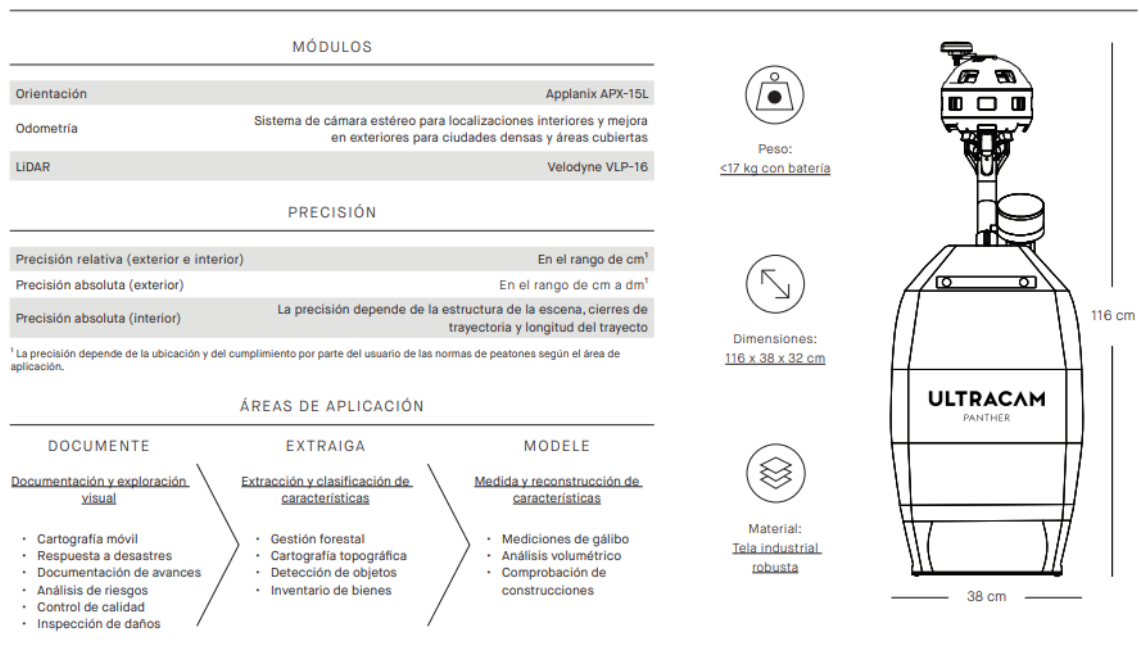


Figura 58. Especificaciones Ultracam Panther (1). Fuente: GTBibérica (2020).

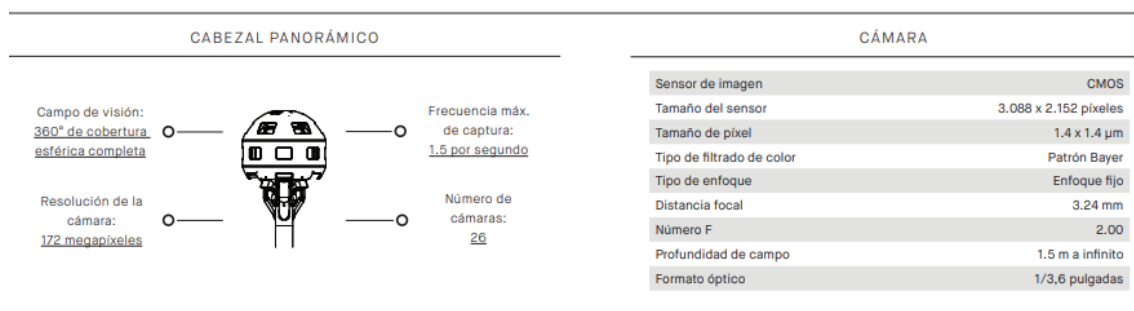


Figura 59. Especificaciones Ultracam Panther (2). Fuente: GTBibérica (2020).

Ambos modelos cuentan con el LiDAR Puck Velodyne VLP-16, aprovechándose así de la miniaturización de sensores. Respecto a la cámara, el sistema de Microsoft para la captura de imagen esférica es de 172 megapíxeles, mientras que Leica conjuga cinco cámaras ubicadas estratégicamente para proporcionar un campo de visión 360° x 200°.

En cuanto al posicionamiento, ambos equipos están dotados de sistema de navegación inercial. Sin embargo, Pegasus cuenta también con un receptor GNSS en lugar de únicamente con GPS, por lo que consigue recopilar imágenes y datos LiDAR simultáneamente, además de georreferenciar cuando el GPS no estuviera disponible.

Cuando el GPS no está disponible, Panther optimiza la información de posición utilizando su sensor de odometría visual, mientras que Pegasus aplica la estrategia SLAM, que utiliza dos perfiladores láser que adquieren hasta 600.000 puntos por segundo a una distancia máxima de 50 m, asegurando una precisión entre 5 y 50 cm.

El GNSS puede llegar a proporcionar una exactitud y precisión del orden de escasos centímetros. Aunque, como se ha citado, es casi imposible mantener la señal durante toda la toma de datos a causa de las interrupciones del GNSS y el efecto '*multipath*' (multicamino), fenómeno que provoca interferencias causado por los reflejos en estructuras o superficies reflectoras.

Existe un método de posicionamiento llamado navegación a estima ('*dead reckoning*'), que basa su principio en calcular la posición respecto a la anterior. Su principal defecto, si es utilizado durante largos períodos de tiempo, es la aparición de errores que se van arrastrando y aumentando, incluyendo el error de Abbe (desplazamiento entre la posición real de un objeto y la medición obtenida, siendo un aumento del error angular sobre la distancia). Esto conduce a una deriva cada vez mayor entre la ubicación real y lo que el sistema cree encontrar. Dichos errores vienen del ruido generados en las mediciones inerciales, por ello los actuales IMU dependen de GNSS para recibir las correcciones o hacerlos trabajar en intervalos de tiempo finito (Joaquín Mateo & Lozano del Pozo, 2014).

En los últimos años, los BMM han sufrido un ligero estancamiento en su evolución. La velocidad a la que evoluciona la tecnología, junto con el perfeccionamiento de la técnica fotogramétrica '*low cost*', han propiciado una ligera deriva del mercado tecnológico respecto a los sistemas de mapeo. La tendencia indica el perfeccionamiento de un '*hardware*' y '*software*' concreto en detrimento de la exploración combinada de recursos.

Esto es debido a que mediante técnicas independientes se pueden conseguir resultados similares a los adquiridos a partir de la conjugación de recursos, salvando un gran escalón económico.

En 2023, sin embargo, llega al mercado la Mosaic Xplor (Figura 60); una mochila capaz de conectarse a 4 redes GNSS simultáneamente (GPS, Galileo, Glonass, BeiDou) proporcionando una precisión submétrica que puede reducirse a centimétrica integrando el sistema de cinemática en tiempo real (RTK). Cuenta con un algoritmo de procesamiento propio capaz de procesar los datos recogidos por sus seis cámaras de 12,32 megapíxeles (4096 x 3008) cada una y además cuenta con dos sensores LiDAR de 360° x 60° que le otorgan un campo de visión final de 360° x 120°. Trabaja con un alcance de hasta 40 m (aunque podría llegar a trabajar en condiciones óptimas a 70 m de distancia) con una precisión de entre 3 y 5 cm que se reduce a menos de 2 mm en distancias de 10 m. Todo ello integrado en un equipo que no supera los 10 kg; siendo 2 kg de cámara, LiDAR y GNSS y 3,5 kg de mochila y soporte, incluyendo también los accesorios adicionales con 2,5 kg aproximadamente. Se mejora así la optimización de espacio/peso de sus predecesoras, que rondaban los 18 kg.



Figura 60. BMM Mosaic Xplor. Fuente: Mosaic (2023).

Por otra parte, el SLAM permite que en la actualidad sus métodos se basen en algoritmos respecto a fotogramas clave. Se basa, también, en la actuación del IMU, aunque su procesamiento de información visual se puede dividir en método directo e indirecto. El directo utiliza la variación de la escala de grises para obtener más información visual y su tiempo de ejecución es más rápido, mientras que el indirecto trata de extraer las características de las imágenes recogidas y combinarlas con las del mapa, minimizando los errores.

Dentro del SLAM existen dos opciones, el Visual SLAM y el LiDAR SLAM. El primero, también conocido como vSLAM, calcula la posición y orientación de un dispositivo con respecto a su entorno al mismo tiempo que mapea utilizando las entradas de la cámara, construyendo un mapa 3D. El segundo se apoya en la tecnología LiDAR.

La técnica vSLAM es una forma rápida de mapear, aunque la aplicación del LiDAR cuenta con mayor precisión, además de mayor calidad y menor distorsión en la captura de datos. La metodología SLAM en exteriores tiene el inconveniente de no poder mirar directamente a la luz solar porque los objetos obtenidos no tendrían contraste suficiente. Un ejemplo de la técnica SLAM lo proporciona FARO con la tecnología GeoSLAM y su modelo ZEB Horizon (Figura 61).

ZEB Horizon

The ZEB Horizon has a range of 100m, making it great for indoor and outdoor use. It is a versatile solution and can used with a range of accessories making it a suitable solution for many different applications.

ZEB Horizon Solution inc. GeoSLAM Hub, & 3-year GeoSLAM Care (K_GS_HORIZON_3YR)
 ZEB Horizon Solution inc. GeoSLAM Hub, & 1-year GeoSLAM Care (K_GS_HORIZON_1YR)

Features:

- 100m range
- 300,000 scanner points per second
- Colorized pointclouds and intensity
- Relative accuracy of 1-3cm
- Up to 5 years hardware warranty with GeoSLAM Care package
- Want more from your pointclouds? Purchase Draw modules such as BIM, Plan or Mining.

Comes with:

- ZEB Horizon Surveying system
 - ZEB Horizon scanner
 - ZEB Horizon data logger with shoulder strap (incl. 14.8V battery)
 - 14.8V Battery charger
 - ZEB Horizon main cable 1.5m length
 - USB memory stick
 - Reference base
- Shipped in a soft carry case
- GeoSLAM Hub software
- 3-year hardware warranty when a valid GeoSLAM care package is purchased for each year with the option to extend to 5 years.



Figura 61. SLAM ZEB Horizon. Fuente: FARO (2024).

Surgen, a partir de estas opciones, diferentes combinaciones para solventar los problemas de georreferenciación. La empresa Viametris, experta en tecnología SLAM, lanzó vMS3D: un sistema de mapeado móvil combinando INS, un receptor interno GNSS y SLAM; además, cuenta con una cámara 360° y un LiDAR giratorio. Su 'software' de post procesamiento analiza la situación y decide de qué tecnología usar los datos, cuenta con sensores precisos de hasta 0,1° (Ninot, 2017).

Combinando las bondades del GNSS a campo abierto, donde si surge la interrupción elegirá los datos tomados de INS o SLAM; la facilidad de SLAM para recopilar información; y la velocidad y orientación proporcionada por el INS para dar apoyo a los sistemas anteriores, proporcionando, además, las correcciones de balanceo y cabeceo para restringir los datos LiDAR, nace uno de los MMS más fiables. Aunque está pensado para vehículos terrestres, es la base para su adaptación a un sistema de mapeo portátil (SBG SYSTEMS, 2023).

Un esquema del funcionamiento de la integración de estos sistemas donde LiDAR y SLAM actúan de forma conjunta (Figura 62) lo proporciona Chang *et al.*, (2019):

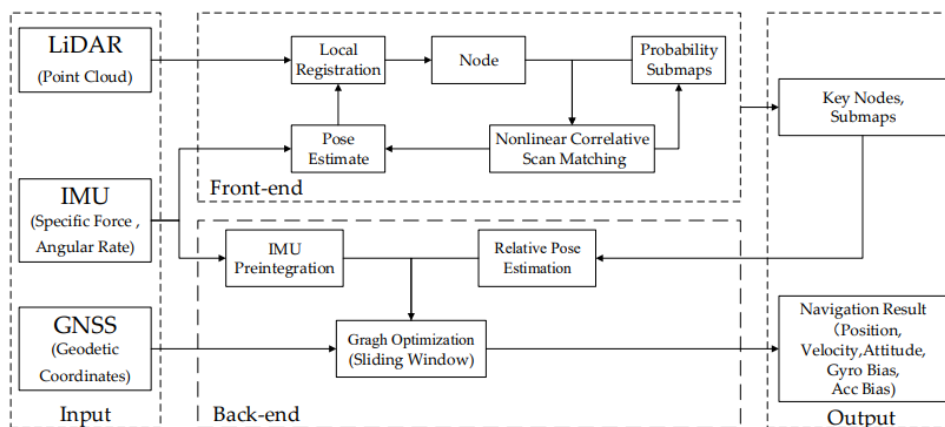


Figura 62. Vista general del sistema GNSS / INS / LiDAR – SLAM. Fuente: Chang, L. *et al.*, (2019).

En la actualidad, varias casas comerciales de cámaras fotográficas digitales como Sony, Olympus o Garmin incorporan a su catálogo las versiones con GPS integrado o, en su defecto, con posibilidad de actuar como Rover dentro de un sistema de posicionamiento RTK (Figura 63).

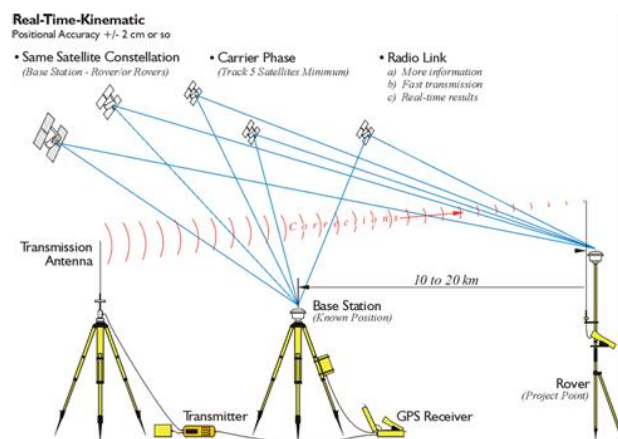


Figura 63. Cinemática en tiempo real (RTK). Fuente: Department of Geography (2023).

En caso de que únicamente se opere con UAVs como sistema de georreferenciación, se debe tener en cuenta que existen dos tipos de precisiones: la precisión de georreferenciación y la precisión en la medición.

La precisión de georreferenciación es una precisión absoluta, es decir, es la capacidad del UAV para determinar su ubicación exacta en la Tierra. Los UAVs, en su mayoría, utilizan tecnología GPS, que aumenta su precisión cuando tiene apoyo de puntos de control terrestre (GCP), por sistemas de cinemática en tiempo real (RTK) o cinemática de postproceso (PPK, Figura 64). La precisión de una medición es una precisión relativa, es decir, indica la verosimilitud entre el objeto real y el virtualizado. Aunque ésta dependerá del área a mapear y de la cantidad de puntos de control, RTK o PPK que podamos aportar para minimizar o discretizar su error. Por tanto, este tipo de técnica se convierte en una solución integral en cuestiones de posicionamiento, georreferenciación y escalas.

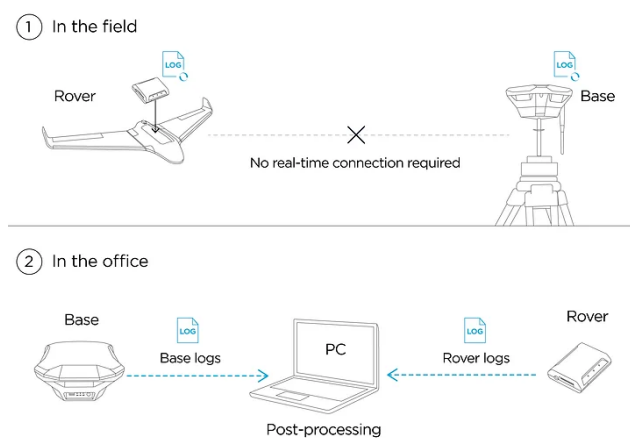


Figura 64. Cinemática de postproceso (PPK). Fuente: Hammer Missions (2023).

5.1.3. PROPUESTA

En definitiva, este Trabajo de Fin de Máster pretende demostrar la viabilidad de la fotogrametría subterránea a partir de:

- La adaptación de la técnica de captura de datos al objeto de estudio particular, fomentando el solape y la continuidad de las fotografías en todo su conjunto, y en especial entre el exterior y el interior del bien subterráneo.

- La elección de sensores de imagen y cámara adecuados y el correcto uso de las técnicas de iluminación artificial, junto con un minucioso tratamiento de las imágenes capturadas y un riguroso procesado fotogramétrico.

Finalmente, como resultado, se obtendrá un modelo 3D único, continuo, bien texturizado y georreferenciado en base a las imágenes del exterior sin necesidad de ubicar o trasladar la posición GPS al interior de la estructura subterránea.

5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

5.2.1. TRATAMIENTO DE IMÁGENES

El tratamiento de imágenes es un factor diferencial en términos fotogramétricos y más, si cabe, en fotogrametría con iluminación adaptada. La calidad del resultado de orientación de las imágenes, de la malla y del propio texturizado pasan por una óptima corrección de la exposición, reducción del ruido y mejora de la nitidez de las imágenes capturadas.

La toma de datos en formato RAW, considerado como el negativo digital, facilita la edición de las imágenes sin perder o sobrescribir el archivo original. Cada fabricante de cámaras fotográficas digitales ha desarrollado su propio *'software'* de procesado de imágenes. Uno de los más potentes respecto a recursos es Adobe Camera Raw que, además, proporciona la posibilidad de edición en bloque de imágenes tomadas en las mismas condiciones iniciales y que, por tanto, requerirán un tratamiento similar.

Los fabricantes de estos *'softwares'* de edición de imágenes han enfocado su nicho de mercado hacia públicos más extensos o sectores que nada tienen que ver con la fotogrametría. En consecuencia, existen opciones de edición muy específicas en algunos ámbitos y el sector fotogramétrico ha de reconducir dichas funcionalidades hacia sus propias investigaciones.

Se puede afirmar que “los límites técnicos de la imagen digital no solo se han visto condicionados por el *'hardware'*, sino también por el *'software'*” (Pereira Uzal, 2013).

Por otra parte, el hándicap inicial de la ausencia de iluminación en fotogrametría subterránea puede convertirse en un punto que juegue a nuestro favor durante la edición de imágenes. La luz artificial aportada es controlable tanto en suavidad y difusión como en potencia. Esta luz artificial incide directamente en los procesos de gestión de color y el balance de blancos (temperatura de color de la luz) que se corrigen mediante la utilización de una carta de color. El *'software'* de edición de imágenes es capaz de interpretar si existe variación en la representación de estos colores y determina su corrección.

Una de las opciones más extendidas para gestionar las características cromáticas consiste en utilizar la tarjeta X-Rite ColorChecker Passport (Sterp Moga *et al.*, 2021). Es una carta de color formada por diferentes parches de pigmentos de color de alta pureza situados en posición fija (Figura 65). La imagen que contiene la carta de color debe convertirse a formato DNG, puesto que el propio *'software'* comercial de ColorChecker Camera Calibration así lo demanda para analizar la propia imagen y generar el perfil de color. Esta operación servirá para, posteriormente, lograr un equilibrio entre los canales de color durante el revelado.



Figura 65. Carta de color sobre “Cabeza de Gárgola” (Catedral de Sigüenza). Fuente: 3D Stoa.

Durante el revelado de imágenes se ejercen las modificaciones pertinentes. Se gestiona el balance de blancos y el perfil de color sobre todas las imágenes de cada bloque en función de la carta de color y su perfil generado con anterioridad. Para calibrar el balance de blancos se toma como referencia el parche gris neutro 18% de la tarjeta de color.

A continuación, se suprime la aberración cromática y el viñeteado de las imágenes de modo automático. La distorsión geométrica es corregida directamente por el propio ‘software’ de fotogrametría ya que, en caso de hacerlo sobre las imágenes, se estaría generando información no fidedigna desde los datos de partida.

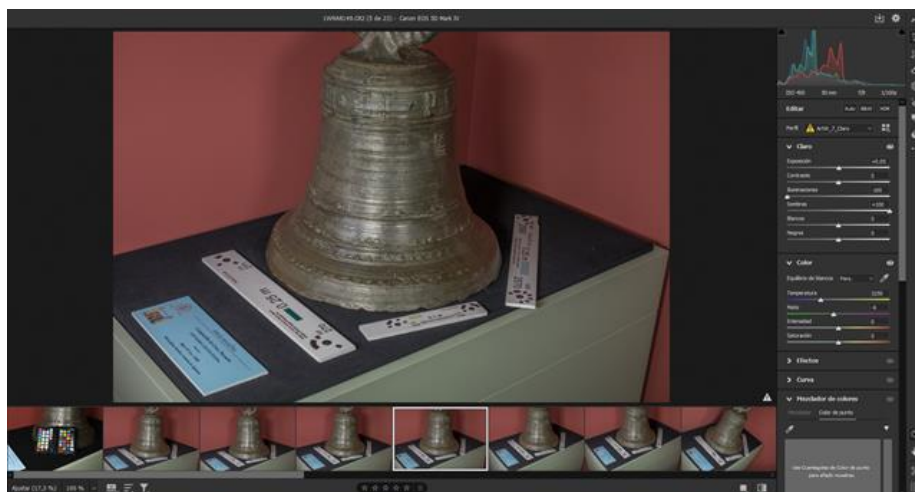


Figura 66. Revelado de imágenes en Adobe Camera Raw de un “Campanillo” de bronce (Catedral de Sigüenza). Fuente: 3D Stoa.

Posteriormente, se controlan, ya bajo la percepción del usuario, los otros factores como la exposición, contraste, la iluminación y las sombras (Figura 66), además de la nitidez y la reducción de ruido.

El revelado de estos archivos RAW puede darse en diferentes formatos y en diferentes calidades. Aunque el tipo de formato es indiferente para su procesado por parte del ‘software’ fotogramétrico, han de tenerse en cuenta los parámetros mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Formatos de imagen en fotogrametría. Fuente: Elaboración propia.

| Formato | JPEG | PNG | TIFF |
|---------------------|------|-------|------|
| Compresión | Sí | No | No |
| Peso | Bajo | Medio | Alto |
| Tiempo de procesado | Bajo | Medio | Alto |

Trabajar con formatos de imagen de menor tamaño implica una mayor velocidad en los tiempos de procesado; sin embargo, se pierde información durante la compresión.

5.2.2. GENERACIÓN DE MODELOS 3D

Los ‘softwares’ de fotogrametría han sufrido grandes avances en los últimos años, si bien es de rigor reconocer que Photomodeler fue quien facilitó el acceso a la fotogrametría a partir de la técnica SfM durante la primera década del siglo XXI.

Durante los años siguientes, surgen nuevas vías de investigación hacia este tipo de ‘softwares’, como VisualSfM y Pix4D, que implementaron un salto de calidad y velocidad en el procesamiento y en el trabajo con UAVs, respectivamente. No obstante, la verdadera revolución en ‘software’ de procesamiento fotogramétrico llegó de la mano de la empresa rusa Agisoft con la comercialización de Photoscan, posteriormente conocido como Metashape.

En esta misma línea nace RealityCapture, en 2016, con la intención de implementar los resultados fotogramétricos al mundo de los videojuegos, realidad virtual y realidad aumentada o cine. Precisamente es Epic Games, desarrolladora de videojuegos y conocida por su tecnología Unreal Engine, quien se hace con los derechos de RealityCapture. Desde abril de 2014, Epic Games ofrece una solución aperturista de RealityCapture, ofreciéndolo como ‘software’ libre y de testeo a estudiantes, proyectos docentes y profesionales que facturen menos de 1.000.000 USD con su ‘software’. El presente y futuro comercial fotogramétrico lo rivalizan RealityCapture y Agisoft Metashape.

Hasta la fecha, diferentes autores (Banfi, 2020), (Vicente Martín, 2021) han investigado el flujo de trabajo fotogramétrico buscando implementar la tecnología ‘Heritage Building Information Modelling’ (HBIM) a la representación 3D del Patrimonio Histórico (Figura 67 y Figura 68).

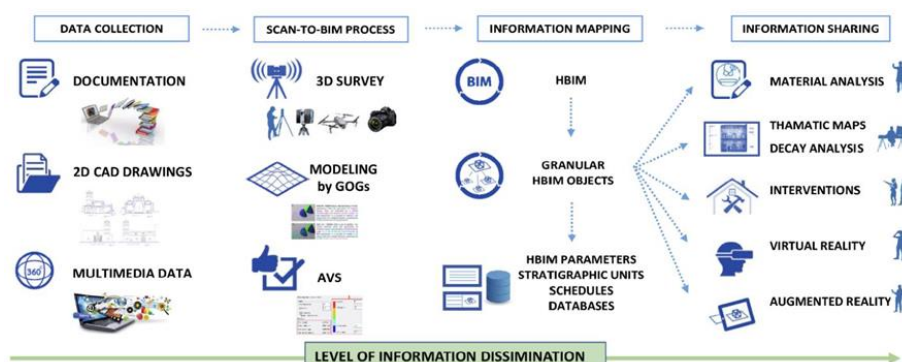


Figura 67. Método de investigación aplicado al sitio arqueológico de S. Nicolò. Banfi, F. (2020).

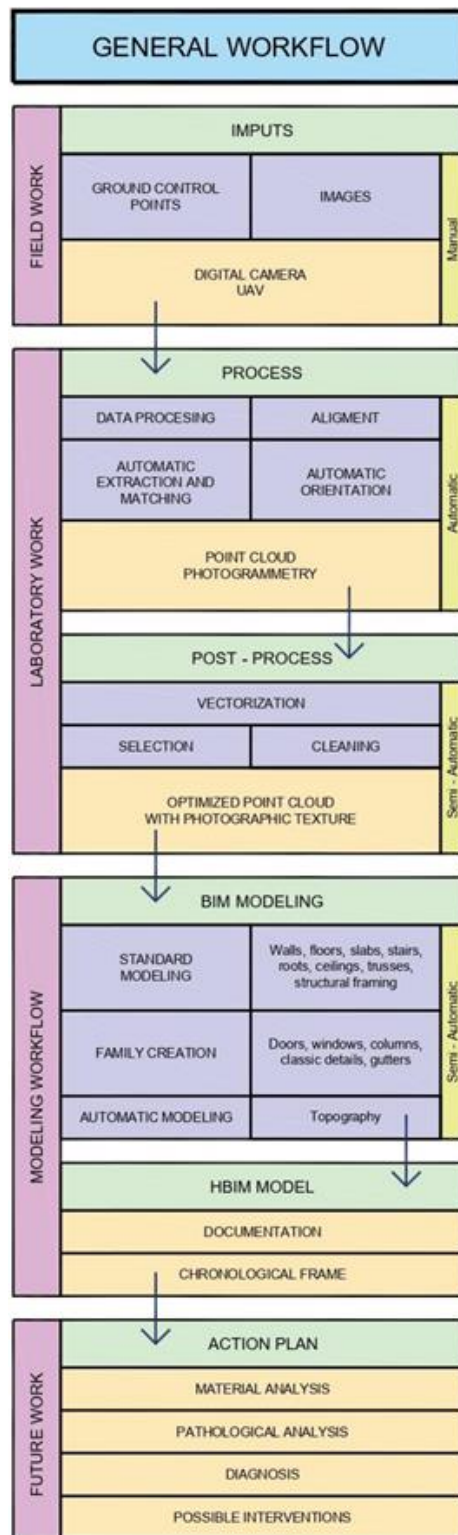


Figura 68. Esquema flujo metodológico. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

El punto de partida consiste en recopilar información a nivel físico y virtual a partir de documentación y archivos históricos, planos, dibujos y fotografías. Posteriormente, el trabajo de campo toma presencia; es el paso 'scan to BIM'. Durante el procesado y postprocesado se estudia y secuencía el modelo en unidades paramétricas a las que se dota de información (Figura 69). Con toda esta información generada se crea un Plan de Acción de Futuro que incluye en sus pasos iniciales el análisis del material y diagnóstico de patologías para proponer las líneas de intervención.

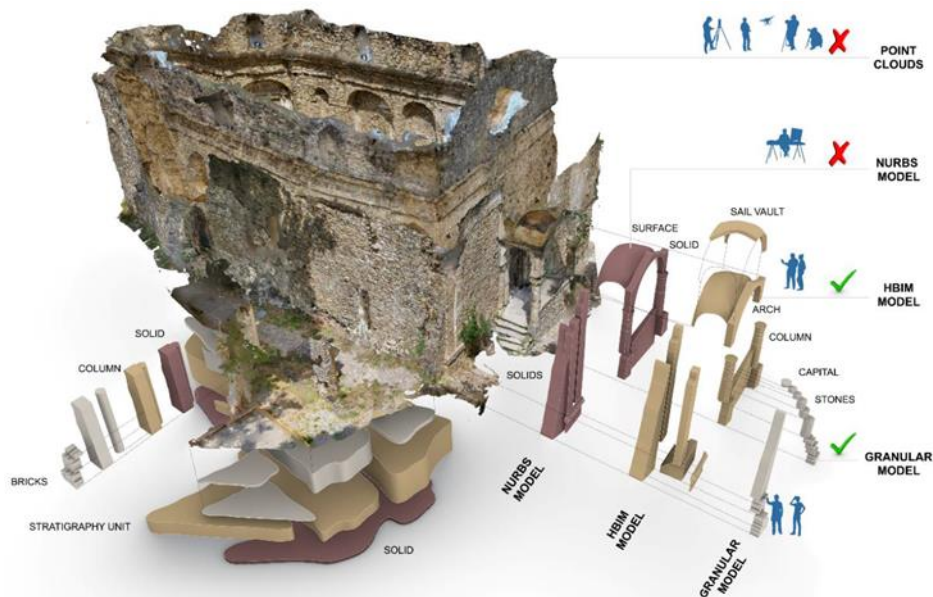


Figura 69. Generación de modelos paramétricos. Fuente: Banfi, F. (2020).

En lo que al procesado propiamente dicho se refiere (Figura 70), el primer paso consiste en volcar todas las imágenes editadas anteriormente en uno o varios bloques. Esta secuenciación en bloques de las imágenes corresponderá, por un lado, a conseguir una mayor rapidez de procesado y, por otro, a dividir por zonas el modelo a generar en caso de que no exista el suficiente solape y continuidad entre las tandas de imágenes y los propios bloques de trabajo.

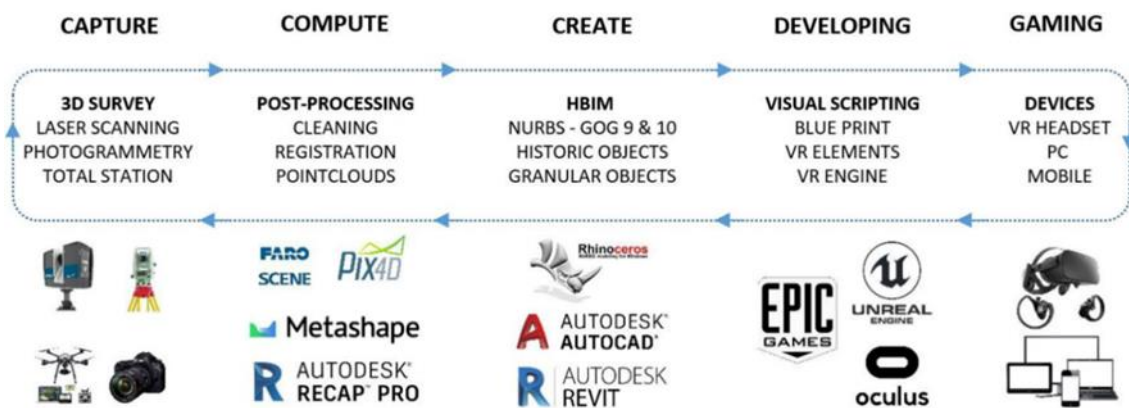


Figura 70. Flujo de trabajo digital y herramientas del proyecto de realidad virtual implementado. Fuente: Banfi, F. (2020).

A continuación, se alinean estas imágenes de modo automático. El ‘software’ utiliza puntos del modelo presentes en imágenes correlativas para crear un mapa desde el que estima la posición de cada cámara (fotografía) en el momento de la captura (Figura 71). El procesado de alineación de imágenes consiste en la extracción de puntos característicos de las imágenes y su correspondencia en las demás. Esta operación permite resolver “la posición angular y espacial de cada fotografía empleada, a la vez que permite conocer los parámetros internos de la cámara. Una vez se conocen las orientaciones internas y externas de las fotografías, la posición espacial de cada píxel se resuelve por intersección de haces proyectivos” (Vicente Martín, 2021).

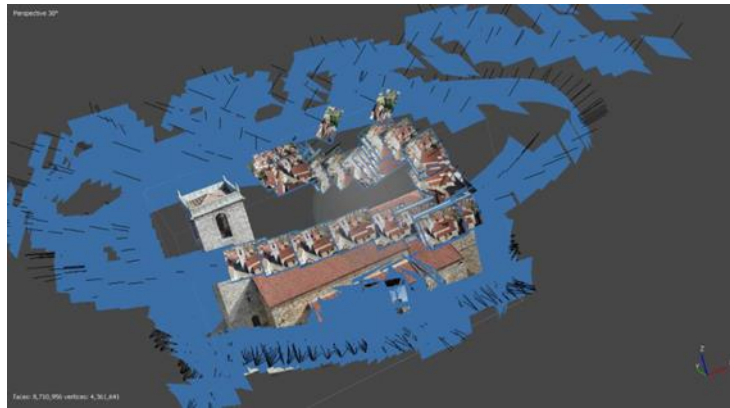


Figura 71. Posicionamiento toma fotográfica exterior, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

Hasta hace pocos años, mediante un proceso de enmascarado manual de cada imagen (Figura 72), se conseguía facilitar la resolución de la alineación de imágenes evitando el cálculo sobre zonas irrelevantes al objeto de estudio. Actualmente, dicha alineación puede calcularse incluyendo un parámetro que excluye del procesado los puntos de paso inmóviles, tales como el cielo y otros elementos externos sobre los que no se ejerce el foco de estudio. Este proceso genera una nube de puntos dispersa a partir de la citada intersección de haces proyectivos.

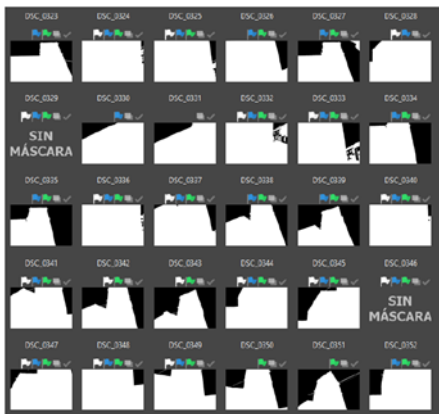


Figura 72. Previsualización de máscaras manuales, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

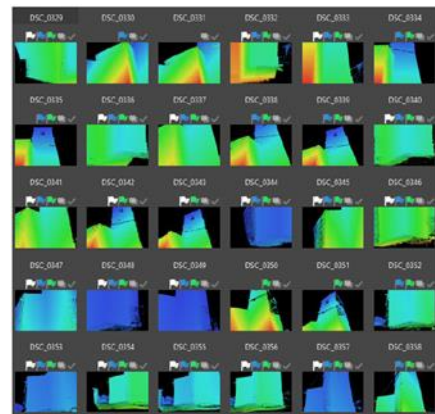


Figura 73. Previsualización de mapas de profundidad, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

El proceso lineal para generar la malla pasaba, inevitablemente, por conseguir previamente la nube de puntos densa, que se generaba a partir de los mapas de profundidad calculados sobre las propias imágenes e interpolaba los puntos que deberían existir entre los ya calculados previamente en la nube dispersa. Este proceso conseguía una densificación de la nube, y podía calcularse con diferentes calidades de densidad. Aunque actualmente la malla puede calcularse directamente a partir de los mapas de profundidad (Figura 73) con una calidad superior a la conseguida a partir de la nube densa, ésta sigue constituyendo un pilar fundamental para el estudio de resultados (Figura 74), permitiendo incluso realizar secciones (Figura 75 y Figura 76) y la limpieza y supresión de puntos de la nube (Figura 77 y Figura 78) que no se desea que entren en el cálculo de la consiguiente malla.



Figura 74. Nube de puntos, iglesia N^a S^a de la Asunción, Monleón (Salamanca). Fuente: Vicente Martín, P. (2021). Enlace a Sketchfab: <https://skfb.ly/ooozx>.



Figura 75. Sección transversal, Recap. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

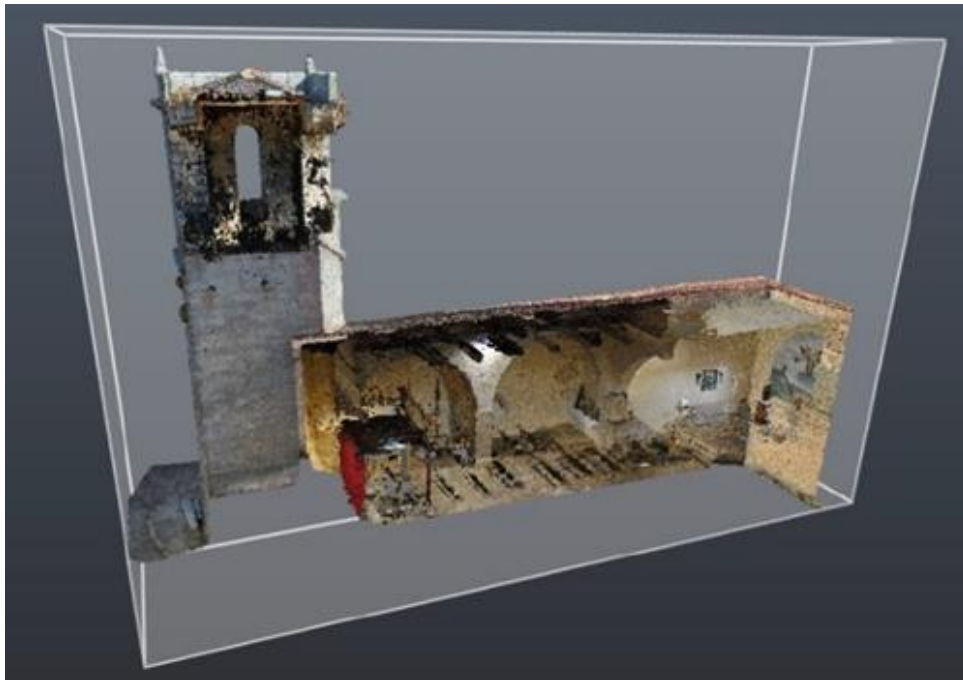


Figura 76. Sección longitudinal, Recap. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)

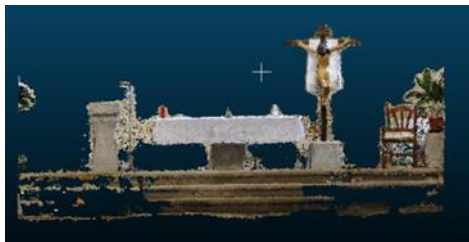


Figura 77. Zonas parciales de la nube de puntos interior, Cloudcompare. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).



Figura 78. Paso previo a eliminar los puntos correspondientes al mobiliario, Cloudcompare. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

Una vez generada la malla, se puede interpretar el resultado a partir de los diferentes modos de visión que permite el 'software' fotogramétrico. Siguiendo una secuencia lógica nos encontramos con: el modelo en malla de alambre (Figura 79), correspondiente a la triangulación por proximidad de los puntos; la malla compacta en tono monocromo (Figura 80), propia del área de cada triángulo alámbrico; la malla sombreada (Figura 81), perteneciente al color de vértices extrapolados al área de dicho triángulo; la malla con nivel de confianza, correspondiente a la cantidad y calidad de las zonas del modelo registradas; y la malla con la textura propiamente dicha.

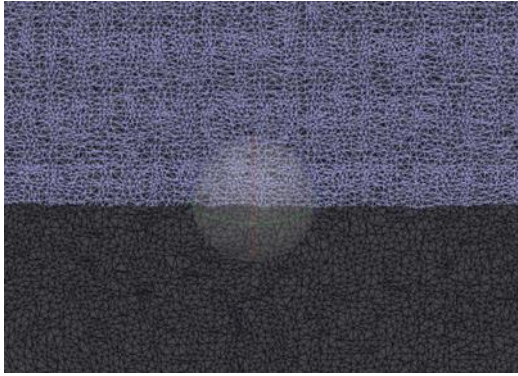


Figura 79. Detalle del mallado de alambre, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

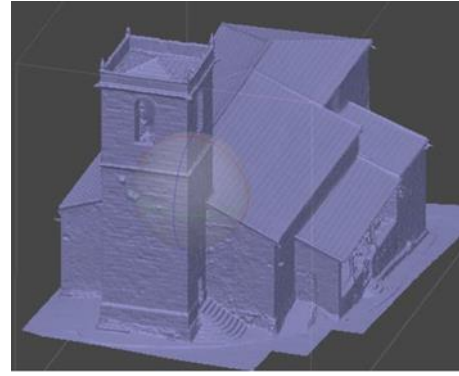


Figura 80. Malla compacta monocroma, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

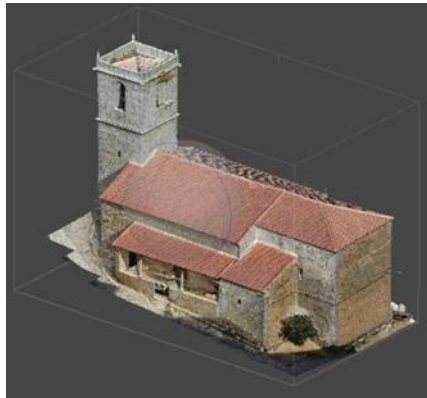


Figura 81. Malla con color de vértices, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

Por último, se crea la textura (Figura 82) con la calidad requerida y en la cantidad de mapas necesarios para garantizar la calidad de los resultados (Figura 83).

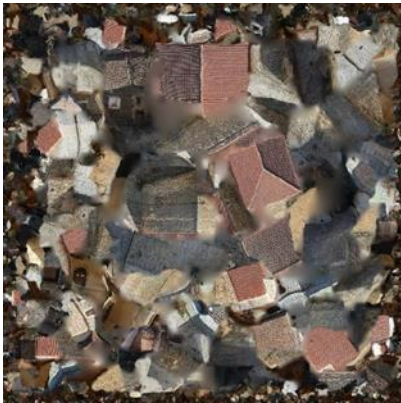


Figura 82. Textura, formato JPG. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

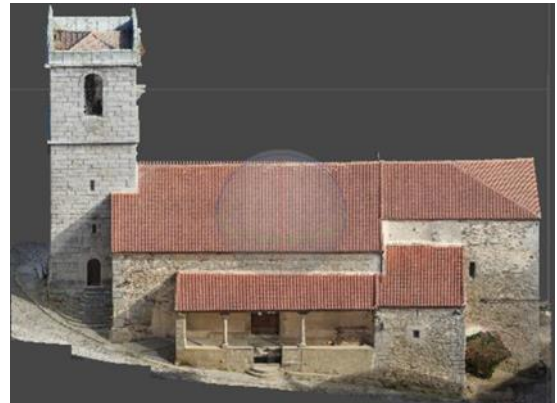


Figura 83. Modelo final texturizado, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021).

El escalado y georreferenciación vendrán determinados por una o varias de las siguientes posibilidades: la toma de puntos de control terrestres mediante un sistema de posicionamiento terrestre RTK-GPS, la captura de imágenes a partir de un UAV con sistema GPS integrado y la toma de medidas manuales sobre el propio modelo mediante flexómetro o distanciómetro láser.

5.2.3. POSTPROCESADO DE RESULTADOS

La divulgación del patrimonio pasa por la accesibilidad del mismo. Para ello, la optimización y postproceso de los modelos 3D fotogramétricos inciden directamente en su facilidad de difusión.

El modelo 3D original generado tiene un elevado peso, que limitará su manejabilidad tanto en diferentes dispositivos como en la multitud de plataformas web habilitadas para su alojamiento.

La optimización y el postproceso admiten razonablemente una pequeña pérdida de información en cuanto a precisión, detalle y calidad se refiere, pero, en cambio, permitirá su difusión y divulgación en la red.

Esta técnica consiste en una optimización de la geometría que va directamente ligada a la optimización de texturas. El mecanismo de optimización de geometría consiste en aplicar la técnica de retopología (Figura 84), es decir, aplicar una reducción geométrica a la malla original. Se obtiene una malla simplificada, de bajo poligonaje.

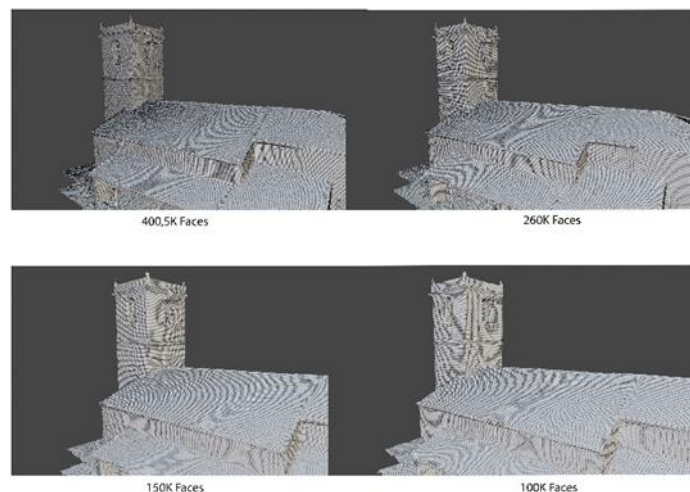


Figura 84. Proceso de retopología. Curso Optimización y postproceso de modelos 3D fotogramétricos, Koré Formación (2022). Fuente: Elaboración propia.

La optimización de texturas conlleva mantener visualmente la calidad original a partir de una reproyección de las mismas. Es decir, se consigue trasladar la textura del modelo original hacia el modelo reducido, pudiendo incluso reducir la calidad de la propia textura durante este proceso.

Una vez aplicada la técnica de retopología, se obtendrá un modelo 3D que aumentará su manejabilidad en la red. Este tratamiento hacia el producto final conseguirá una reducción del tamaño y peso de los archivos y, en consecuencia, una mejora en los tiempos de carga, asegurando mantener la calidad visual intacta mientras se posibilita la accesibilidad en cualquier dispositivo.

Los resultados pueden alojarse en diferentes plataformas web que permiten la visualización de modelos 3D, como Sketchfab y Autodesk Viewer. Estas opciones permiten la inspección del modelo o la nube de puntos que permanecerá alojado en la web sin fecha de vencimiento.

Banfi (2020) va más allá y propone la transmisión del conocimiento patrimonial a través de la interpretación de la corriente tecnológica y social del futuro inmediato. Sugiere, desde un punto de vista inmersivo, acercar y hacer partícipe a la sociedad de nuestro patrimonio (Figura 85). Involucra, también, a los campos científicos de restauración, arquitectura y geomática para promover un aumento de la conciencia cultural y social de los lugares arqueológicos y edificios históricos. Su investigación versa sobre las diferentes posibilidades que ofrecen la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR), estudiando las diferentes gafas del mercado: Oculus Quest, Oculus Rift, Playstation VR, Oculus GO, HTC Vive, Pansonite 3D VR Glasses, Samsung Gear VR, Lenovo Mirage Solo, Google Daydream View y HP VR1000-100 MR.



Figura 85. El proyecto VR de las antiguas ruinas del sitio arqueológico de Bajardo. El usuario puede interactuar con objetos animados de realidad virtual y descubrir los valores históricos y culturales de uno de los patrimonios construidos más importantes del oeste de Liguria. Fuente: Banfi, F. (2020).

6. CASOS DE ESTUDIO

Los casos objeto de estudio descritos en este Trabajo de Fin de Máster han sido elaborados por un equipo multidisciplinar liderados por Miguel Fernández Díaz, especialista en digitalización 3D del Patrimonio y socio fundador de 3D Stoa – Patrimonio y Tecnología S. L. Todos los datos e imágenes incorporados en este capítulo son información y resultados extraídos de los informes elaborados por Miguel Fernández entre los años 2018 y 2020.

Sobre ellos se basa un estudio pormenorizado en relación al ‘*software*’ fotogramétrico, a los tiempos de procesado, a los resultados obtenidos y, por supuesto, a la técnica de toma de datos empleada en función de las características intrínsecas a cada situación.

La técnica empleada se basa en levantamientos fotogramétricos, aunque, en ocasiones, apoyada y combinada mediante la tecnología de láser escáner. El escáner láser ofrece precisión y rapidez en la resolución de estructuras complejas que, gracias a la nube de puntos generada, le confiere a la fotogrametría un soporte fundamental para conseguir capturar las zonas de sombra o débilmente iluminadas.

El trabajo de campo consiste en la documentación terrestre y subterránea, tanto del interior como del exterior del edificio, si lo hubiera, que alberga la estructura subterránea. Para las tomas aéreas se trabaja con una aeronave Phantom 4 Pro y para las tomas terrestres con una cámara réflex DSLR Pentax K-50 y una Canon EOS M100. El modelo 3D se georreferencia mediante el uso de un poste topográfico receptor Emlid RS2 con tecnología RTK-GPS tomando puntos de control, véase Anexo I – ‘*Hardware*’ y ‘*software*’ utilizado.

El tratamiento y procesado de los datos se realiza mediante un ‘*hardware*’ lo suficientemente potente y especializado, en función de las especificaciones técnicas del ‘*software*’ de fotogrametría empleado, así como el tratamiento y gestión de las nubes de puntos obtenidas mediante escáner láser.

En primer lugar, la edición y alineación de fotografías y las posibles nubes de puntos obtenidas por el escáner resulta un paso crucial en el devenir del proyecto. El ‘*software*’ fotogramétrico, a partir de la aplicación de algoritmos de visión computacional, consigue detectar los puntos comunes entre la sucesión de imágenes capturadas, generando una nube de puntos dispersa. Sobre esta nube se acoplarán las nubes individuales de cada estacionamiento láser, aportando mayor densidad y calidad a la posterior nube de puntos densa.

Posteriormente, se crea la malla 3D del modelo a partir de los mapas de profundidad y la nube de puntos densa. Esta geometría viene determinada a través de la unión vectorial de los puntos más próximos entre sí tomando como referencia sus coordenadas en el espacio (X, Y, Z) y su información colorimétrica (R, G, B). El resultado es una malla triangulada y sombreada.

Finalmente, se aplican las texturas o imágenes ‘*bitmap*’ sobre la citada geometría de la malla para obtener el resultado final fiel a la realidad. El postproceso de resultados se ejecuta con la finalidad de conseguir un modelo 3D optimizado y manejable, ortoimágenes de alzados, plantas y secciones e, incluso, trasladar la información a programas tipo CAD y SIG (Sistema de Información Geográfica).

Las posibilidades son múltiples, tanto en los aspectos divulgativos como en los puramente científicos.

Los casos de estudio que se abordan en el presente trabajo son los siguientes:

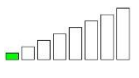




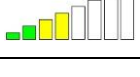

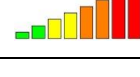
- Bodegas del Arrabal, Talamanca del Jarama.
- Túnel, Vallecas.
- Bodegas, Vicálvaro.
- Pozo Viejo, Corral de Almaguer.
- Noria del Vivero, Bailén.
- Bodega, Brunete.

Para cada uno de ellos se establece una ficha inicial con los datos más característicos e importantes de cada proyecto. Entre ellos destacan datos inherentes al propio proyecto como la fecha, la descripción y localización, y datos referentes a la propia ejecución como el equipo utilizado, dificultades enfrentadas y soluciones adoptadas.

Además, se proyecta una tabla de tiempos de ejecución del proyecto desde la toma de datos hasta el postprocesado final, pasando por el procesado en sí mismo y sus diferentes etapas.

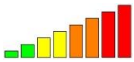
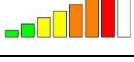
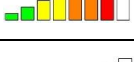
La Tabla 4 relaciona la toma de datos la técnica, la iluminación auxiliar aportada y el método de georreferenciación elegido, con el tiempo invertido en la recopilación de información. Por otro lado, en función del número de imágenes, escaneos láser, GCP obtenidos y el sentido en la toma fotográfica, se puede estimar gráficamente la cantidad de tiempo que consume cada subproceso. Además, se valora el tiempo y dedicación destinado al resultado final: el entregable que servirá como hilo conductor entre la documentación, conservación, digitalización y divulgación del patrimonio.

Tabla 4. Gráfica de tiempos del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

| Tiempos del proyecto | Bajo 0 - 2 h | Medio - Bajo 2 - 5 h | Medio - Alto 5 - 10 h | Alto > 10 h |
|-----------------------------|---|---|---|---|
| Leve |  |  |  |  |
| Moderado |  |  |  |  |

6.1. BODEGAS DEL ARRABAL, TALAMANCA DE JARAMA

Tabla 5. Ficha Bodegas del Arrabal. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|--|---|---|---|
| Promotor | Abril Urmente Arqueología |  | |
| Trabajo | Virtualiz Bodegas del Arrabal | | |
| Fecha | Julio de 2018 | | |
| Situación | Talamanca de Jarama | | |
| Descripción | | | |
| <p>El caso de estudio refleja la necesidad de generar un modelo digital georreferenciado y fidedigno a nivel geométrico y de texturizado. A partir de él, se pretende generar un estudio patológico sobre el que ejecutar soluciones técnicas y arquitectónicas que consoliden y rehabiliten la estructura. El acceso al interior se realiza a pie de calle a través de la fachada principal. El interior alberga un vestíbulo del que parten las galerías cubiertas con bóveda de cañón, en ladrillo.</p> | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara réflex DSLR Pentax K-50 Aeronave DJI Phantom 4 Pro Receptor RTK GNSS, Emlid Reach RS2 FARO Laser Scanner Focus 3D X330 | | Software de procesado | Reality Capture |
| | | Imágenes | 8.045 |
| | | Puntos de control | 8 |
| | | Escáner láser | 67 |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Velocidad de procesado | | Toma de datos |  |
| | | Procesado | Alineación |
| Nube |  | | |
| Malla |  | | |
| Textura |  | | |
| Solución adoptada | | Postprocesado | |
| Fotogrametría aérea y terrestre combinada con láser escáner Uso de focos y antorchas LED Georreferenciación a partir de GCP Procesado individual de galerías | |  | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| La solución plantea la combinación de la nube generada por el escáner y con la generada por fotogrametría, georreferenciadas mediante GCP terrestres. La rapidez de ejecución se consigue procesando galerías independientes. | | | |

6.1.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

Las dificultades que plantea la situación pasan por georreferenciar correctamente las galerías subterráneas (Figura 86, derecha) en relación a la toma de datos exterior (RTK-GPS y puntos de control) (Figura 86, izquierda), solventar la toma de datos contando con la inexistente iluminación y mitigar los tiempos de procesado de un área tan extensa.



Figura 86. Proceso de toma de datos 3D láser exterior (izquierda) e interior (derecha).

6.1.2. Solución adoptada

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara réflex DSLR Pentax K-50, con la que se consigue una calidad de imagen óptima, y una aeronave Phantom 4 Pro. Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa. En cuanto al levantamiento con escáner láser terrestre se emplea el modelo Faro X330. Se generan 67 puntos de estacionamiento mediante láser escáner terrestre y 8.045 imágenes. En la Figura 87 se muestra la nube dispersa.



Figura 87. Nube de puntos dispersa de la bodega, exterior e interior.

Al no existir iluminación en el interior, se necesitan focos y antorchas LED de luz blanca, alimentados por baterías.

La técnica fotogramétrica combinada con láser escáner (67 escaneos) arroja un error máximo de 6,8 mm y un error medio de 1,6 mm. Entre ellos existe un solapamiento escaso en un 8,3 % de los escaneados a completar con fotogrametría.

El proyecto se procesa por fases y etapas para favorecer la velocidad de procesado: cuerpo exterior, zona subsuelo, galería 1 tramo 1 (Figura 88), galería 1 tramo 2, galería 2, galería 3, galería 4, galería 5, galería 6-7. La Figura 89 muestra la fase de texturizado del modelo 3D en las galerías 6 y 7.

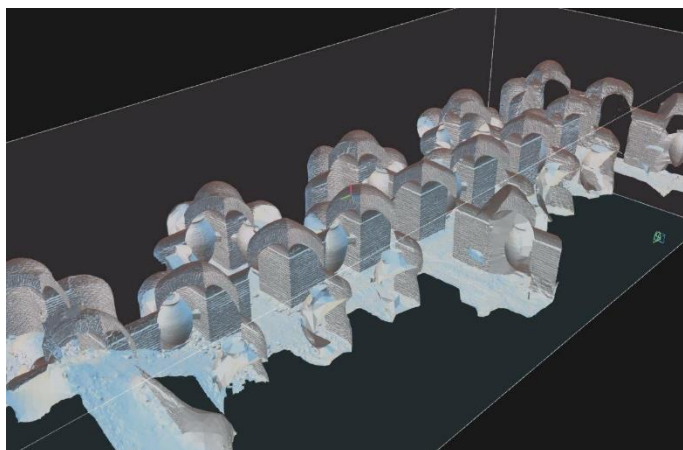


Figura 88. Malla de una de las partes de la Galería 1.



Figura 89. Fase de texturizado del modelo 3D en las Galerías 6 y 7.

6.1.3. Resultados

Se desarrolla un modelo tridimensional completo, con ortofotos de alta definición e información colorimétrica fidedigna que favorecen la obtención de planimetrías y secciones precisas a partir de las que trabajar en la consolidación y restauración de las estructuras.

Entre los productos obtenidos, podemos generar un visor 3D del modelo general o de cada galería individualmente. A tal fin, se disminuye la resolución del modelo para que el visor pueda ejecutarse en cualquier tipo de equipo informático (Figura 90). Sobre el modelo, al encontrarse escalado, se pueden tomar las medidas que se precisen. Además, permite obtener fácilmente cualquier sección en cualquier punto.

Para trabajos técnicos más concretos, se genera una ortoimagen de cada planta y del alzado (Figura 91), así como algunas secciones del edificio (Figura 92), de cara a su exportación a formato CAD y la creación de planimetrías.

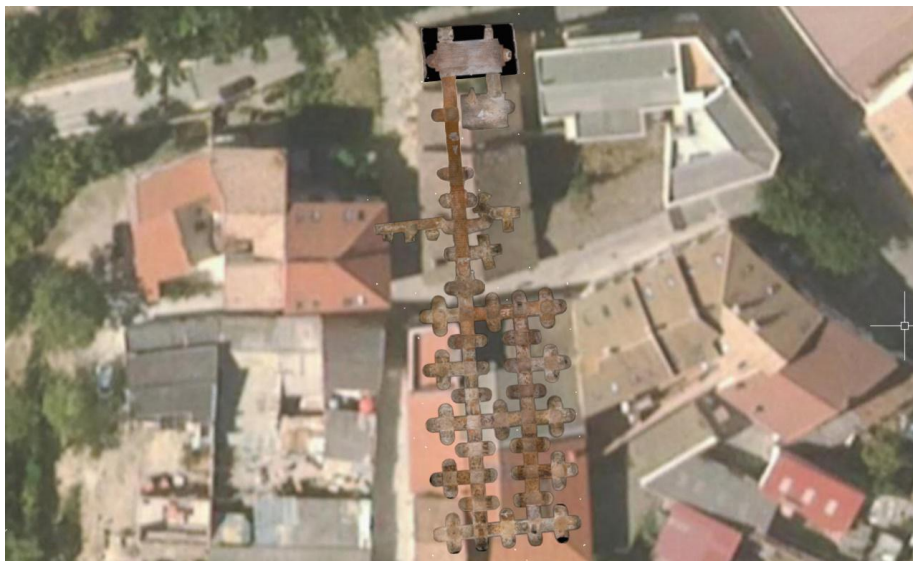


Figura 90. Situación de la bodega sobre imagen satelital actual del Instituto Geográfico Nacional.



Figura 91. Ortoimagen del alzado de la fachada de la bodega.



Figura 92. Sección generada sobre el alzado norte de la Galería 4.

Estos resultados aportan rigurosidad técnica, planimétrica y colorimétrica. Se puede apreciar, en una comparativa respecto a los planos ejecutados por J. Sandoval en el año 1991 (Figura 93 y Figura 94), cómo la fotogrametría es capaz de arrojar una precisión milimétrica y de aportar una calidad en concepto de textura anteriormente inexistente.

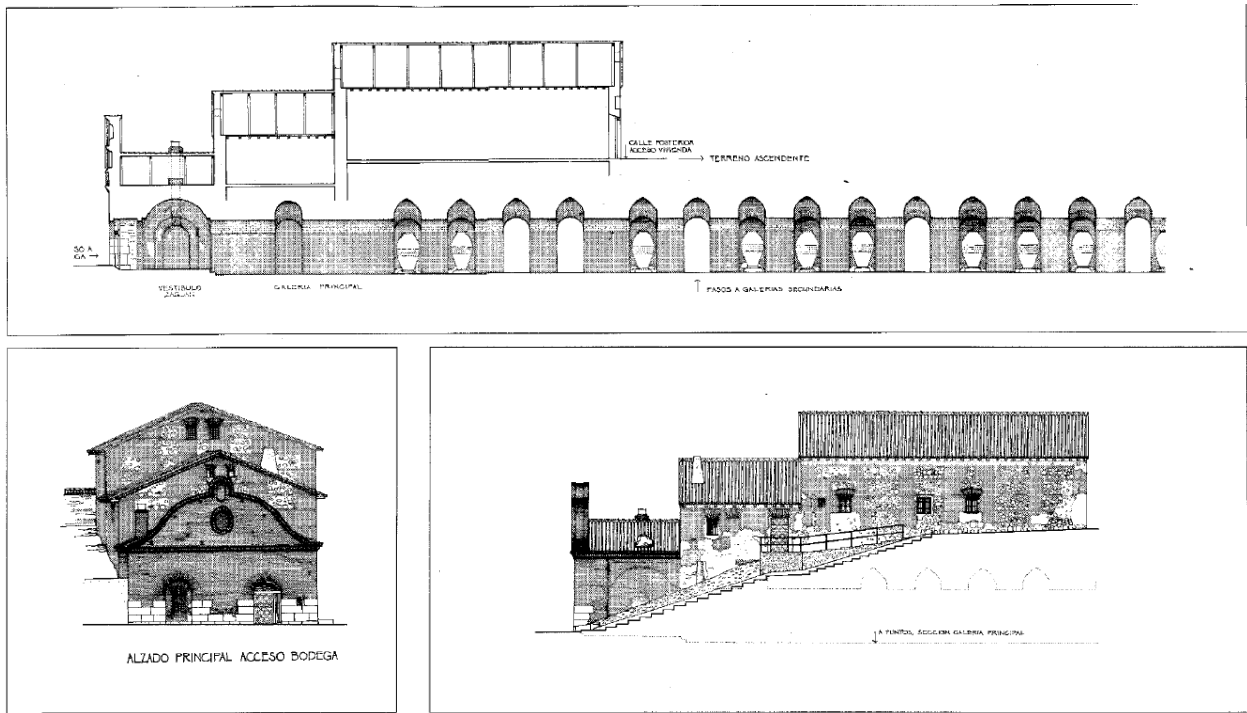


Figura 93. Sección longitudinal, alzado principal y alzado lateral, levantamiento. Fuente: Sandoval, J. (1991).

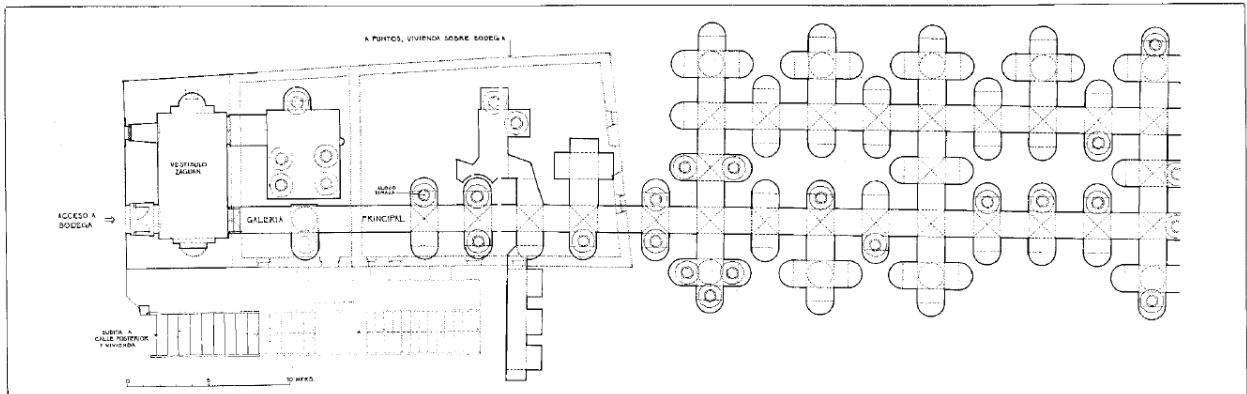







Figura 94. Planta, levantamiento. Fuente: Sandoval, J. (1991).

6.2. TÚNEL, VALLECAS

Tabla 6. Ficha Túnel, Vallecas. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|--|---|---|-------------------|
| Promotor | Naos Consultoría |  | |
| Trabajo | Virtualización Túnel | | |
| Fecha | Marzo de 2020 | | |
| Situación | Vallecas, Madrid | | |
| Descripción | | | |
| <p>La estructura subterránea está compuesta de 3 galerías excavadas en el nivel geológico, anegadas de agua. El sistema de construcción responde a la clásica excavación en mina con entibado de madera tanto en techo como en paredes. Se accede por uno de los pilotes que se estaban realizando durante la ejecución del proyecto constructivo.</p> | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara réflex DSLR Pentax K-50 | | Software de procesado | Agisoft Metashape |
| | | Imágenes | 673 |
| | | Puntos de control | 4 |
| | | Medidas de distancia | Escalas gráficas |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| <p>Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Velocidad de actuación, riesgo de derrumbe</p> | | Toma de datos | |
| | | Procesado | Alineación |
| Nube |  | | |
| Malla |  | | |
| Textura |  | | |
| Solución adoptada | | Postprocesado | |
| <p>Fotogrametría terrestre Uso de focos y antorchas LED Georreferenciación a partir la ubicación de la boca del pozo</p> | |  | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| <p>El riesgo de derrumbe propició la premura en la toma de datos, priorizando la virtualización de la estructura subterránea en detrimento de la georreferenciación que, a la postre, se ejecuta a partir de la boca del pozo de acceso. Los puntos de control del interior y jalones consolidan la escala. La intervención arqueológica propone la limpieza de estructuras, inspección minuciosa, análisis documental, análisis gráfico y propuesta técnica para la conservación.</p> | | | |

6.2.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

Se ejecuta una intervención arqueológica en estructura y galerías subterráneas de la Guerra Civil. Las dificultades enfrentadas son la limpieza de estructuras, la inspección visual, el análisis documental y el análisis gráfico (planta y alzado). Se realiza una propuesta técnica para la conservación en conjunción con el proyecto de reforma integral del edificio formativo, situado en la esquina entre la calle Francisco Laguna y la calle Corral de Cantos (Vallecas, Madrid).

En palabras de la notificación de requerimiento presentada en la Dirección General de Patrimonio Cultural:

La estructura subterránea está compuesta de 3 galerías excavadas en el nivel geológico, que se encontraban totalmente anegadas de agua en el momento del hallazgo. El sistema de construcción responde a la clásica excavación en mina con entibado de madera tanto en techo (Figura 95) como en paredes. Señalar, que las galerías documentadas son parte de una estructura más grande de la que no se han localizado los accesos originales debido a la presencia de derrumbes. Se ha accedido por uno de los pilotes que se estaban realizando durante la ejecución del proyecto constructivo.

La interpretación es que estas estructuras habrían servido a modo de refugio durante la Guerra Civil Española.

La comunicación pone de manifiesto el precario estado de conservación de las galerías, con derrumbes en varios sectores y con el riesgo de desprendimientos, concluyendo que no se deben realizar más trabajos.



Figura 95. Puerta reutilizada como elemento de contención para evitar el derrumbe de la galería.

Las dificultades que plantea el caso pasan por la inspección visual (Figura 96) y la rápida actuación para valorar el riesgo de derrumbe, además de georreferenciar correctamente las galerías subterráneas en relación a los datos del exterior (RTK-GPS y puntos de control), y solventar la captura fotográfica contando con la inexistente iluminación.



Figura 96. Inspección visual desde el pozo de acceso.

6.2.2. Solución adoptada

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara réflex DSLR Pentax K-50, con la que se consigue una calidad de imagen óptima. Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa.

El interior de la estancia se ilumina con una antorcha LED de luz blanca difusa para una correcta refracción de la luz sobre las paredes de margas o “peñuela”. También se ha utilizado una pértiga telescópica para acceder a las zonas que presentaban menor seguridad.

Se apunta que la galería situada más al norte tiene una menor resolución. Ante el riesgo de derrumbe (Figura 97) y debido a que es la zona más peligrosa de acceso y más anegada, se utilizó una pértiga telescópica de 7 m, realizando las tomas a pulso. No obstante, la anchura, altura y profundidad de dicha galería ha quedado registrada correctamente.



Figura 97. Trabajos con riesgo de derrumbe.

6.2.3. Resultados

Se desarrolla un modelo tridimensional completo, con ortofotos de alta definición e información colorimétrica fidedigna, que favorecen la obtención de planimetrías y secciones precisas a partir de las que trabajar en la consolidación y restauración de las estructuras.

Entre los productos obtenidos, podemos generar un visor 3D del modelo general o de cada galería individualmente. A tal fin, se disminuye la resolución del modelo para que el visor pueda ejecutarse en cualquier tipo de equipo informático. Sobre el modelo, al encontrarse escalado, se pueden tomar las medidas que se precisen. Además, permite obtener fácilmente cualquier sección en cualquier punto.

Para trabajos técnicos más concretos, se genera una ortoimagen de cada planta, así como algunas secciones del edificio, de cara a su exportación a formato CAD y la creación de planimetrías. La ortoimagen de la planta cenital recoge el techo de la galería, ya que el suelo tenía el suficiente barro y agua como para no poder ser bien captado en un levantamiento fotogramétrico. En la Figura 98 se aprecia la ubicación del pozo de acceso y la disposición de las galerías.



Figura 98. Ubicación del pozo de acceso (verde) y disposición de las galerías.

En los modelos tridimensionales, la galería más al norte aparece peor representada y con menor resolución, ya que el acceso era más difícil y se realizó con pocas imágenes tomadas desde la pértiga telescópica. Las tomas de esta galería sirvieron para recoger anchura, altura y contorno de planta.

Según el informe generado, la descripción general de la estructura subterránea hallada se compone de 3 galerías, junto con el acceso en pozo (Figura 99), a las que vamos a denominar como Galerías 1, 2 y 3 (Figura 100).



Figura 99. Acceso en pozo y sección de la galería principal con medidas.



Figura 100. Vista general y denominación de las galerías.

Las orientaciones de dichas galerías (en sus ejes longitudinales) (Figura 101), con respecto al norte geográfico, son las siguientes:

Galería 1: 107° (NO-SE) Galería 2: 44° (SE-NE) Galería 3: 134° (NO-SE)

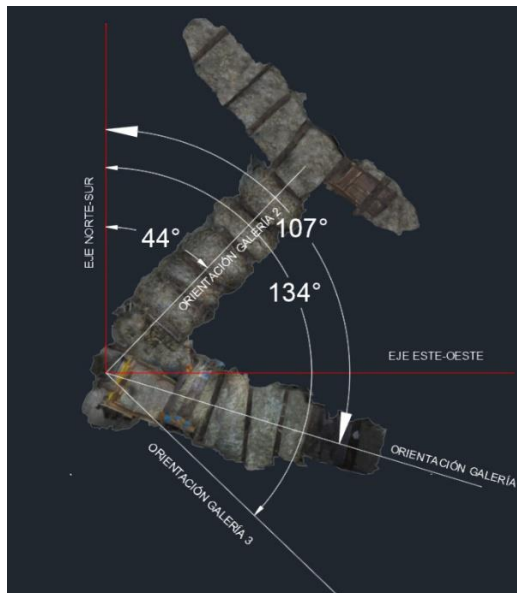


Figura 101. Orientación de las galerías.

Según dicho informe: “La estructura subterránea se encuentra excavada en margas verdosas, material geológico conocido popularmente como “tosco” o “peñuela”, típica sedimentación del período Mioceno en la Comunidad de Madrid. La cualidad de estas margas es la de una arcilla expansiva, que se contrae con la humedad y se expande al secarse. Al estar las galerías totalmente anegadas en el momento de su hallazgo, el posterior drenaje mediante bombeo podía dar paso a una fase de expansión y, por lo tanto, de posible derrumbe de la estructura.”

“No obstante, parece que, tras su drenaje, la misma estructura original de entibado y posteo de las galerías, sirvió para contener buena parte de la expansión de las margas, por lo que podemos acceder sin problema al subterráneo. Del mismo modo, el hecho de que las galerías estuvieran anegadas ha posibilitado un excelente estado de conservación de los postes y tablas de madera que conforman el entibado” (Figura 102).



Figura 102. Estado de conservación de las estructuras (Galería 2).

En cuanto al sistema de construcción de las galerías, se puede decir que responde a la clásica excavación en mina, donde el material arcilloso es horadado manualmente (a pico o piqueta) (Figura 103) y extraído del mismo modo (seguramente con carretillas y cubos).

En cada tramo de avance, que mide entre 0,4 y 0,6 m, se construía un posteo de entibado con dos postes verticales y uno horizontal, a modo de dintel (Figura 104). Si era necesario, tanto en el techo como en las paredes, entre estos tramos de entibado, se colocaban tablonces gruesos u otro tipo de elementos, como puertas recicladas, para contener la expansión de las arcillas o posibles grietas que amenazarán derrumbes.



Figura 103. *Marcas de pico en el techo de la Galería 2.*



Figura 104. *Vista del sistema de entibado en la Galería 2 (desde el punto de acceso).*

Cabe señalar que las galerías estudiadas son parte de una estructura más grande. En primer lugar, no se localiza ninguno de los accesos originales, sino que entramos por el vaciado para un pilotaje de obra justo en el vértice de unión de dos galerías. Además, se han documentado dos puntos con derrumbes, que nos indicarían la continuación del tunelado. Uno se localiza en el extremo Este de la Galería 1, mientras que el otro se ubica en el extremo Oeste de la Galería 3 (Figura 105).

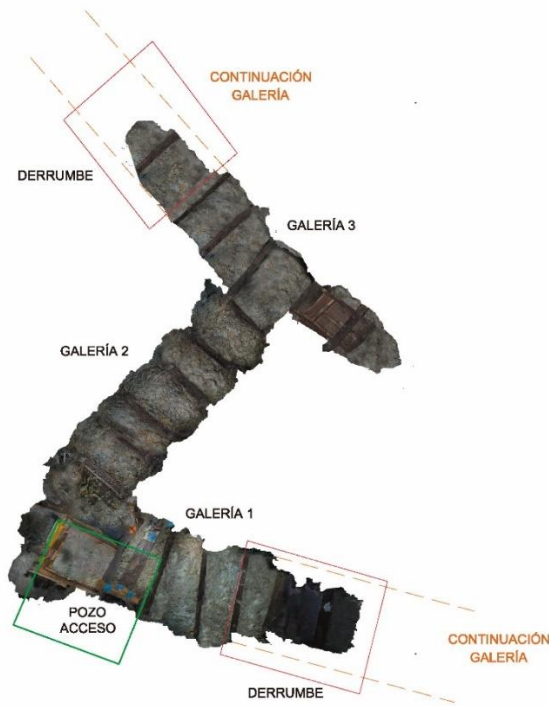


Figura 105. Derrumbes y posibles continuaciones de galerías.

Las maderas que forman el entibado tienen distintas secciones irregulares, aunque muchas cuentan con sección circular y algunas con sección cuadrangular. Muchas de las maderas presentan numerosos clavos, que bien podrían servir para colgar lámparas o guiar el cableado eléctrico. Uno los postes, ubicado en la pared oeste de la Galería 2, muy cerca del actual acceso, presenta varios restos de cuerda claveteados para formar una guía vertical (Figura 106).



Figura 106. Detalle de poste con restos de cuerdas claveteados (Galería 2).

Para la colocación de los postes de entibado colocados en los techos de la galería, se practicó un rebaje de los extremos para poder encajarlos sin utilizar clavos en los postes laterales (Figura 107).



Figura 107. Detalle de unión de postes de entibado de las galerías.

Respecto a las descripciones individuales de las galerías y sus elementos singulares:

Galería 1: En realidad se trata de un tramo de galería, ya que hacia su lado Este podemos documentar un derrumbe (Figura 108). El tramo conservado, que directamente se puede documentar y medir desde el acceso actual (pozo de pilotaje), tiene una orientación de 107° (NO-SE) y mide 3,40 m de longitud y 1,35 m de anchura máxima. Su altura máxima es de 1,61 m. Los tramos entre posteados del entibado van desde los 0,38 a los 0,58 m.



Figura 108. Vista de la Galería 1 desde acceso.

La Galería 1 presenta varias particularidades. Una es la conservación de parte de un cableado eléctrico que termina en un bombín de bombilla, colocado mediante clavos en su ubicación original, bajo una viga de madera (Figura 109).



Figura 109. Bombín y cableado en la Galería 1.

Por otro lado, dicha Galería 1, se encuentra a una cota 0,4 m más alta que las otras dos galerías. La diferencia es apreciable en el techo, ya que en el suelo presenta un pequeño escalón de 0,12 m de altura en su extremo Oeste (Figura 110). Desconocemos si bajo el derrumbe existen más escalones o si el suelo de la galería sigue una trayectoria ascendente hacia el Este. La galería, en su lado Este, no presenta un techo con tanta diferencia de cota, sino que el desnivel con respecto a la Galería 2 es de +0,10 m. No obstante, esto podría ser causado por el ya citado hundimiento del techo en esta zona y no tiene nada que ver con el suelo, que no podemos documentar más allá de 0,85 m debido a la cantidad de material arrastrado por el derrumbe.



Figura 110. Ortoimagen en sección de la Galería 1, señalando desnivel en techo, escalón y pavimento.

Por debajo de este escalón y ya en el vértice de unión con la Galería 2 (y, por lo tanto, casi bajo el pozo de acceso actual), se documentan, bajo el lodo, 5 ladrillos macizos formando una suerte de pequeño pavimento (Figura 111).



Figura 111. Pequeño parche de pavimento de ladrillos.

Galería 2: Esta galería se conserva completa y une la galería 1 con la 3. Su orientación es de 44° (SE-NE) y mide 6,03 m de longitud y 1,21 m de anchura máxima. Su altura máxima es de 1,47 m. Los tramos entre posteados del entibado van desde los 0,34 a los 0,56 m.

No presenta particularidades constructivas en la excavación de la estructura, aunque sí en el entibado. Como hemos visto en el apartado anterior, uno de los postes de la pared Oeste cuenta con tramos de cuerda guiados por clavos, mientras que en la pared derecha identificamos un tablón de madera, colocado como sujeción entre tramos de entibado, que podría ser indicativo de su reutilización. De igual modo, hacia el extremo Norte de la galería, en su pared Este, se encuentran restos de una puerta o postigo de ventana (0,75 m x 0,50 m), con el mismo fin de contención de las arcillas (Figura 112).



Figura 112. Ortoimagen de detalle del alzado Este de la Galería 2, con elementos de carpintería reutilizados como método de contención de las arcillas expansivas.

Galería 3: Esta galería es la que documentamos más al Norte. Debido a la distancia desde el pozo de acceso y a que no se puede drenar del todo, registramos este tramo utilizando una pértiga telescópica. La orientación de la galería es de 134° (NO-SE). En su extremo Este está cortada y no continúa, mientras que en el extremo Oeste presenta un gran derrumbe (Figura 113), con lo que es presumible su continuación en dicha dirección. El tramo conservado mide 4,91 m de longitud y 1,14 m de anchura máxima. Su altura máxima es de 1,45 m. Los tramos entre posteados del entibado van desde los 0,47 a los 0,80 m.



Figura 113. Vista Oeste de la Galería 3.

Al igual que en la Galería 2, no se encuentran particularidades constructivas, si bien se documenta también una pieza de carpintería reutilizada. Se trata de un fragmento de puerta ubicado en el techo (Figura 114), y cuyas dimensiones son 0,84 x 0,55 m. Para la recopilación de medidas y distancias se tiene como referencia las dimensiones del jalón (Figura 115).






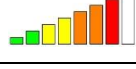


Figura 114. Vista Este de la Galería 3 con fragmento de puerta reutilizada.



Figura 115. Galería 3 anegada con escala.

6.3. BODEGAS, VICÁLVARO

Tabla 7. Ficha Bodegas, Vicálvaro. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|---|---|--|---|
| Promotor | Áqaba Aqueólogos |  | |
| Trabajo | Virtualización de Bodegas | | |
| Fecha | Mayo - Julio de 2019 | | |
| Situación | Vicálvaro, Madrid | | |
| Descripción | | | |
| <p>Las diferentes galerías cuentan con accesos independientes, aunque están conectadas entre sí. En varios casos las conexiones están interrumpidas por el derrumbe de la galería. Se genera un modelo digital georreferenciado y fidedigno a nivel geométrico y de texturizado. A partir de él, se establece un estudio patológico sobre el que ejecutar soluciones técnicas y arquitectónicas que consoliden y rehabiliten la estructura.</p> | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara réflex DSLR Pentax K-50 Receptor RTK GNSS, Emlid Reach RS2 | | Software de procesado | Agisoft Metashape |
| | | Imágenes | 4.223 |
| | | Puntos de control | 7 |
| | | Medidas de distancia | - |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Velocidad de procesado | | Toma de datos |  |
| | | Procesado | Alineación |
| Nube |  | | |
| Malla |  | | |
| Textura |  | | |
| Solución adoptada | | Postprocesado |  |
| Fotogrametría terrestre Uso de focos y antorchas LED Georreferenciación a partir de GCP Procesado individual de galerías | | | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| <p>La rapidez de ejecución se consigue procesando galerías independientes, aunque la integración completa del conjunto de galerías podría haberse producido virtualizando la superficie terrestre entre las embocaduras. Los GCP resultan de especial importancia para la ubicación absoluta y relativa entre galerías. La aparición de nuevas estructuras en el futuro llevará a cuestionarse el planteamiento inicial de actuación y toma de datos.</p> | | | |

6.3.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

El caso de estudio, las bodegas aparecidas en la C/ San Cipriano, 42, Vicálvaro (Madrid), refleja la necesidad de generar un modelo digital georreferenciado y fidedigno a nivel geométrico y de texturizado a partir de una captura de datos (Figura 116) y la inspección visual del entorno (Figura 117).



Figura 116. Captura de datos en el interior de las galerías.



Figura 117. Trabajo de campo, inspección visual.

Las dificultades que plantea la situación pasan por georreferenciar correctamente las galerías subterráneas en relación a la toma de datos exterior (RTK-GPS y puntos de control) y solventar la captura de datos contando con la escasa iluminación en la mayoría de los tramos.

Para la inspección visual y en la previsión del trabajo de campo se toman como referencia el croquis manual (Figura 118) de Mónica Major, arqueóloga, y la planimetría urbanística (Figura 119) sobre la que geolocalizar posteriormente la bodega. La singularidad principal de este proyecto es que cuenta con zonas de estructura completamente al descubierto.

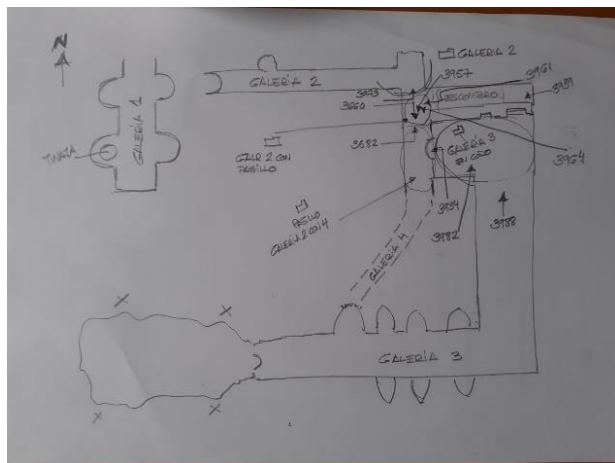


Figura 118. Croquis manual realizado por Mónica Major.

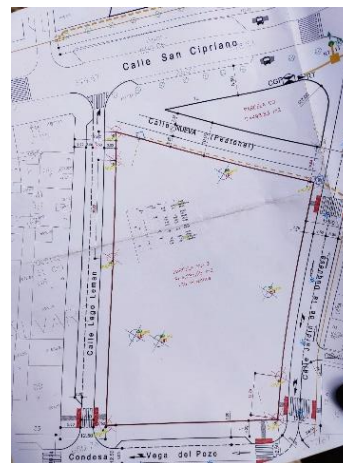


Figura 119. Planimetría bodega. Fuente: Áqaba Arqueólogos.

6.3.2. Solución adoptada

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara réflex DSLR Pentax K-50, con la que se consigue una calidad de imagen óptima. Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa.

El interior de la estancia se ilumina con una antorcha LED de luz blanca difusa para una correcta refracción sobre los acabados de mortero (Figura 120).



Figura 120. Toma de datos con iluminación artificial.

6.3.3. Resultados

Se desarrolla un modelo tridimensional completo, con ortofotos de alta definición e información colorimétrica fidedigna, que favorecen la obtención de planimetrías y secciones precisas a partir de las que trabajar en la consolidación y restauración de las estructuras. Se aprecia en la Figura 121 la planta correspondiente a la galería 1.



Figura 121. Planta Galería 1.

Entre los productos obtenidos, podemos generar un visor 3D del modelo general o de cada galería individualmente. A tal fin, se disminuye la resolución del modelo para que el visor pueda ejecutarse en cualquier tipo de equipo informático. Sobre el modelo, al encontrarse escalado, se pueden tomar las medidas que se precisen. Además, permite obtener fácilmente cualquier sección en cualquier punto.

Para trabajos técnicos más concretos, se genera una ortoimagen de cada planta (Figura 122 y Figura 123), así como algunas secciones del edificio, de cara a su exportación a formato CAD y la creación de planimetrías. La ortoimagen de planta cenital recoge el techo de la galería, ya que el suelo tenía el suficiente barro y agua como para no poder ser bien captado en un levantamiento fotogramétrico.



Figura 122. Planta Galería 2.



Figura 123. Planta Galería 3-4.

Además, a la empresa ejecutora de la obra le resultó una información fundamental poder contar con el tipo de material y la cota de cada bóveda para poder acometer la excavación, minimizando así los riesgos (Figura 124 y Figura 125).

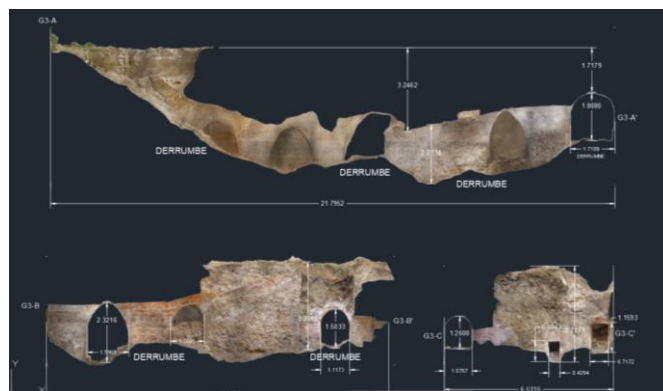


Figura 124. Secciones de Galería 3 con ortoimagen en CAD y anotaciones.

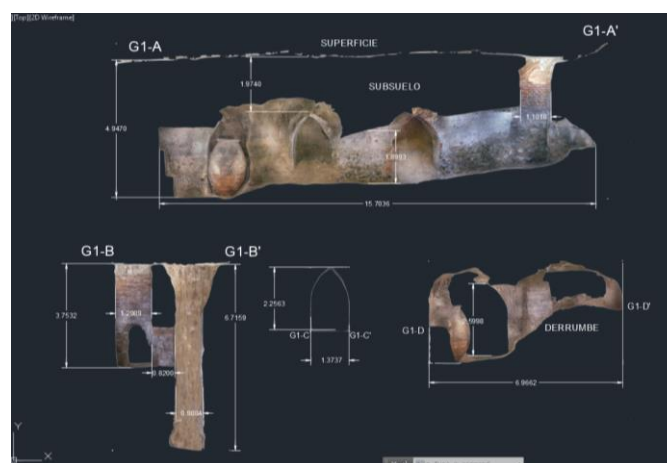




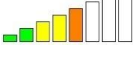



Figura 125. Secciones de Galería 1 en CAD y anotaciones.

6.4. POZO VIEJO, CORRAL DE ALMAGUER

Tabla 8. Ficha Pozo Viejo, Corral de Almaguer. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|---|---|--|---|
| Promotor | SFC Arquitectura |  | |
| Trabajo | Virtualización de Pozo | | |
| Fecha | Marzo de 2019 | | |
| Situación | Corral de Almaguer, Toledo | | |
| Descripción | | | |
| Intervención arquitectónica y arqueológica en el pozo sito en Corral de Almaguer. El proyecto engloba la reforma de la finca para fines educativos y formativos. El acceso al pozo se hace desde la planta cuadrangular del edificio que lo alberga, el pavimento interior mantiene la cota del entorno exterior. La profundidad total del pozo ronda los 20 metros. | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara Canon EOS M100 Aeronave DJI Phantom 4 Pro Receptor RTK GNSS, Emlid Reach RS2 | | Software de procesado | Agisoft Metashape |
| | | Imágenes | 2.871 |
| | | Puntos de control | 3 |
| | | Medidas de distancia | 1 |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Toma de datos en suspensión con ayuda de pértiga | | Toma de datos |  |
| | | Procesado | Alineación |
| Nube |  | | |
| Malla |  | | |
| Textura |  | | |
| Solución adoptada | | Postprocesado |  |
| Fotogrametría aérea y terrestre Uso de focos y antorchas LED Georreferenciación a partir de GCP | | | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| La integración de fotogrametría aérea con terrestre, sin obstáculos en el entorno que dificulten su conexión, junto con la georreferenciación RTK a cielo abierto, supone un buen caso de estudio para valorar el uso de UAV con GPS integrado, sin necesidad de utilizar GCP. El resultado arroja una correcta alineación de las imágenes y una perfecta georreferenciación, incluso salvando el escollo del trabajo en suspensión y en profundidad. | | | |

6.4.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

Las dificultades que plantea la situación pasan por georreferenciar correctamente el pozo en relación a la toma de datos exterior (RTK-GPS y puntos de control) y conseguir unas medidas precisas de sus dimensiones, además de solventar la captura de datos contando con la inexistente iluminación.

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara Canon EOS M100, con la que se consigue una calidad de imagen óptima, y una aeronave Phantom 4 Pro (Figura 126). Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa. El interior del pozo se ilumina con un foco LED de luz blanca difusa colgado de una estructura auxiliar de trabajo.



Figura 126. Vista aérea, pozo en Corral de Almaguer.

Para la toma rigurosa de datos se propone un trabajo en suspensión a partir de una polea de ascenso/descenso, asegurada por técnicos competentes. Asimismo, se valora el uso de pértiga de sujeción en el interior del pozo, de modo horizontal, para permitir el anclaje y la estabilidad en los momentos de la captura de imágenes.

6.4.2. Solución adoptada

La primera fase del trabajo consiste en la limpieza del elemento patrimonial (Figura 127), que transcurre durante los días 18 y 19 de marzo de 2019. A tal fin, un técnico arqueólogo especialista se introduce en el pozo, mientras otro está de apoyo en el exterior para subir los materiales y la basura acumulada.



Figura 127. Trabajos previos, limpieza y acondicionamiento.

El técnico del interior del pozo se encuentra asegurado en todo momento con doble cable gracias a otro técnico de apoyo, dedicado específicamente a trabajos verticales (tres personas en total) (Figura 128). Se cuenta, además, con personal de apoyo del Ayuntamiento de Corral de Almaguer, para extraer agua con una bomba y ayudar a la recogida de materiales en el exterior.



Figura 128. Polea de descenso/ascenso (izquierda) y estructura de trabajo (derecha).

En primer lugar, se procede a extraer todo el material acumulado en el fondo, tanto basura contemporánea como material arqueológico (cerámica y piezas de hierro y latón). Tras limpiar el fondo, se procede a extraer raíces de plantas y algas de las paredes (Figura 129). El estudio del material arqueológico, tras su limpieza y recogida, corresponde al director arqueológico de la intervención, quien cuenta con el permiso nominal de la administración correspondiente.



Figura 129. Limpieza de raíces y algas de las paredes del pozo.

La segunda fase del trabajo consiste en el levantamiento tridimensional a través de técnicas fotogramétricas, durante el día 20 de marzo de 2019. La mayor parte del levantamiento es subterráneo, apoyado con pértiga de estabilización (Figura 130), aunque se realiza también el levantamiento del interior de la caseta que contiene el pozo, con cámara DSLR, así como del exterior de la misma (con UAV cuadricóptero). Los resultados de los levantamientos servirán como base para trabajos posteriores.



Figura 130. Uso de pértiga para mantener la estabilidad en la toma de datos.

Como valor añadido, se aporta la nube de puntos generada (Figura 131) y el modelo 3D del pozo (Figura 132). Además, los propios modelos 3D aportan más información científica y potencial divulgativo en forma de otros productos generados a partir de los mismos, tales como visores 3D, ortoimágenes o formatos CAD, entre otros. Se aporta, también, información complementaria como la nube de puntos y diferentes secciones.



Figura 131. Nube de puntos.



Figura 132. Malla y situación del pozo.

6.4.3. Resultados

Se facilita una ortoimagen a modo de esquema en planta de la situación del pozo en relación a la estructura que lo alberga. En la Figura 133 se señalan los puntos de vista del modelo 3D con una escala gráfica, para su comprensión. Se aporta una sección y un 'render' en sección a modo de comparativa (Figura 134 y Figura 135).

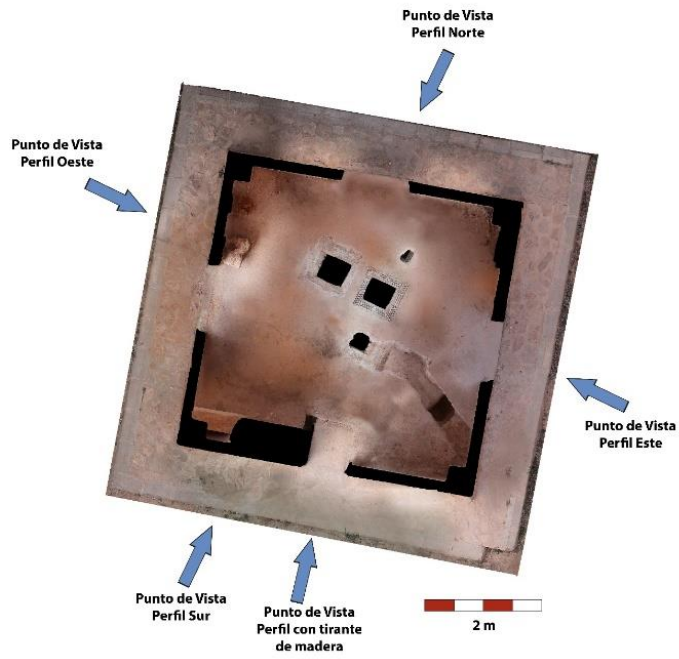


Figura 133. Ortoimagen cenital, esquema en planta.

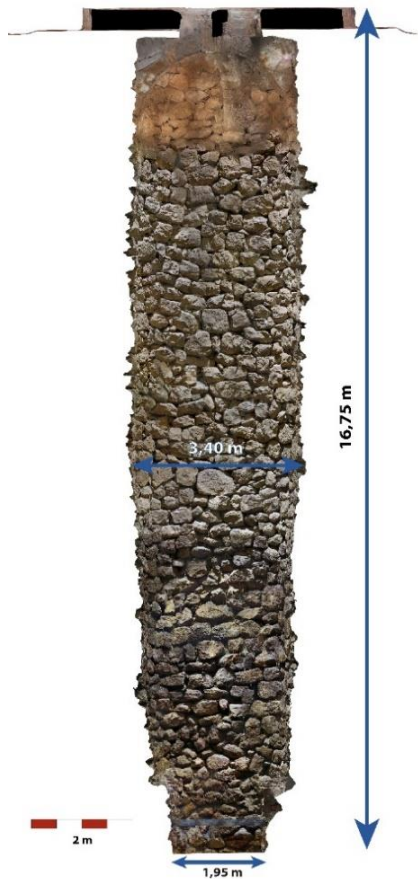


Figura 134. Sección con escala gráfica.



Figura 135. 'Render' en sección.

Por último, como resumen, para dar a conocer los trabajos realizados, se crean varias composiciones gráficas a modo de infografías (Figura 136 y Figura 137).









Figura 136. Tríptico de trabajo de campo.



Figura 137. Infografía resumen de los trabajos realizados.

6.5. NORIA DEL VIVERO, BAILÉN

Tabla 9. Ficha Noria del Vivero, Bailén. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|--|---|--|---|
| Promotor | Ayuntamiento de Bailén |  | |
| Trabajo | Virtualización Noria de Agua | | |
| Fecha | Mayo - Julio de 2019 | | |
| Situación | Bailén, Jaén | | |
| Descripción | | | |
| <p>Se accede al interior a través del acceso original al pozo, entre dos de sus arcos de sustentación. Los 4 grandes arcos que sustentan su bóveda se fechan en época medieval (siglo XII - XIII), si bien se han hallado piezas que indican un uso de la estructura en épocas anteriores.</p> | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara réflex DSLR Pentax K-50 Receptor RTK GNSS, Emlid Reach RS2 | | Software de procesado | Agisoft Metashape |
| | | Imágenes | 1.194 |
| | | Puntos de control | 2 |
| | | Medidas de distancia | 1 |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Toma de datos en profundidad con ayuda de pértiga | | Toma de datos |  |
| | | Procesado | Alineación |
| Nube |  | | |
| Malla |  | | |
| Textura |  | | |
| Solución adoptada | | Postprocesado |  |
| Fotogrametría terrestre Uso de focos y antorchas LED Georreferenciación a partir de GCP | | | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| <p>La fotogrametría terrestre, sin obstáculos en superficie, manteniendo un gran solape entre el interior y exterior del bien, junto con la georreferenciación RTK a cielo abierto, supone otro caso en el que valorar el trabajo mediante UAV con GPS en exteriores sin la necesidad de utilizar GCP. El resultado arroja, nuevamente, una correcta alineación de las imágenes y una perfecta georreferenciación.</p> | | | |

6.5.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

El objetivo principal es el levantamiento fotogramétrico en el interior (Figura 138) y en la superficie de la noria histórica del Vivero, ubicada en el Parque Eduardo Carvajal de Bailén (Jaén), así como la realización de un análisis documental y una propuesta técnica para su rehabilitación, restauración y conservación.



Figura 138. Estado anterior del interior de la noria.

Durante el proceso de excavación se encontraron objetos que podrían estar relacionados con el desarrollo de la histórica Batalla de Bailén y su importancia en este enclave, anteriormente conocido como la huerta Arteaga. Este lugar, próximo al campo de batalla, sirvió como punto de abastecimiento a los soldados mandados por el General Teodoro Reding.

Las dificultades que plantea la situación pasan por georreferenciar correctamente la noria en relación a la toma de datos exterior (RTK-GPS y puntos de control) y conseguir unas medidas precisas de sus dimensiones.

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara réflex DSLR Pentax K-50, con la que se logra una calidad de imagen óptima. Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa. El interior de la estancia se ilumina con una antorcha LED de luz blanca difusa acoplada sobre la cámara fotográfica.

6.5.2. Solución adoptada

En primer lugar, se extrae toda el agua de su interior para poder datar y estudiar su estructura y realizar los refuerzos pertinentes, si procede.

Para la toma rigurosa de datos se propone un trabajo desde el interior, estabilizando la superficie de apoyo en un sistema de andamiaje. Además, se cuenta con la ayuda de una pértiga para poder fotografiar en altura el interior de la noria.

6.5.3. Resultados

A modo divulgativo se proporciona, mediante la plataforma Sketchfab, visualizador web 3D, el modelo fotogramétrico optimizado con las anotaciones pertinentes para favorecer su comprensión:

<https://skfb.ly/6TZrq>

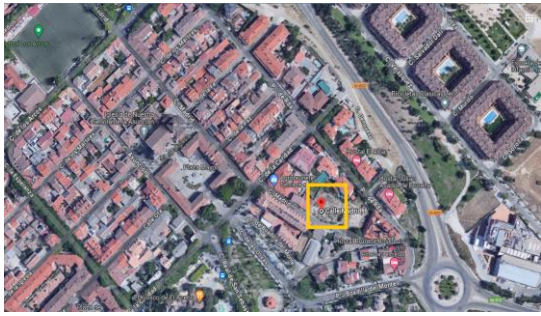






Para dar a conocer los trabajos realizados, se crea una composición gráfica a modo de infografía que puede apreciarse en la Figura 139:



Figura 139. Infografía resumen de los trabajos realizados.

6.6. BODEGA, BRUNETE

Tabla 10. Ficha Bodega, Brunete. Fuente: Elaboración propia.

| | | | |
|---|------------------------------|--|--|
| Promotor | Arqueoestudio S.L. |  | |
| Trabajo | Virtualización de Bodega | | |
| Fecha | Octubre de 2020 | | |
| Situación | Brunete, Madrid | | |
| Descripción | | | |
| Se refleja la necesidad de generar un modelo digital georreferenciado y fidedigno a nivel geométrico y de texturizado. A partir de él, se pretende generar un estudio patológico sobre el que ejecutar soluciones técnicas y arquitectónicas que consoliden y rehabiliten la estructura. | | | |
| Equipo | | Datos de partida | |
| Cámara réflex DSLR Pentax K-50 | Software de procesado | Agisoft Metashape | |
| | Imágenes | 3.049 | |
| | Puntos de control | 3 | |
| | Medidas de distancia | Escalas gráficas | |
| Dificultades | | Tiempos del proyecto | |
| Georreferenciación Ausencia de iluminación natural Extensa área de procesado | | Toma de datos  | |
| Solución adoptada | | Procesado | |
| Fotogrametría terrestre Uso de focos y antorchas LED | | | Alineación  |
| | | | Nube  |
| | | | Malla  |
| | | Textura  | |
| | | Postprocesado  | |
| Resultados | | | |
| Modelo 3D, Visor 3D, Ortoimágenes, Planta, alzados y secciones | | | |
| Conclusión | | | |
| La rapidez de ejecución de un área tan extensa se consigue procesando galerías/tramos independientes, aunque la evolución del 'software' fotogramétrico ha mejorado los algoritmos de procesado, propiciando la posibilidad de procesar toda la tanda de imágenes en bloque. Asimismo, la depuración de la técnica de toma de datos (orientación del recorrido, iluminación...) favorece la velocidad de ejecución del trabajo de gabinete. | | | |

6.6.1. Dificultades y problemáticas enfrentadas

El caso de estudio, la bodega situada en C/ Madrid, 6, Brunete (Madrid), refleja la necesidad de generar un modelo digital georreferenciado y fidedigno a nivel geométrico y de texturizado. A partir de él, se pretende generar un estudio sobre el que ejecutar soluciones técnicas y arquitectónicas que consoliden y rehabiliten la estructura.

Las dificultades que plantea la situación pasan por georreferenciar correctamente las galerías subterráneas y solventar la toma de datos contando con la inexistente iluminación y mitigar los tiempos de procesado de un área tan extensa (167 m²).

6.6.2. Solución adoptada

En los levantamientos terrestres se utiliza una cámara réflex DSLR Pentax K-50, con la que se logra una calidad de imagen óptima. Ello permite obtener un número adecuado de puntos en la malla generada y una información colorimétrica precisa.

El interior de la estancia se ilumina con una antorcha LED de luz blanca difusa acoplada sobre la cámara fotográfica (Figura 140) para una correcta refracción sobre los acabados de mortero.



Figura 140. Captura de datos en el interior de las galerías.

6.6.3. Resultados

Se desarrolla un modelo tridimensional completo, con ortofotos de alta definición e información colorimétrica fidedigna, que favorecen la obtención de planimetrías y secciones precisas a partir de las que trabajar en la consolidación y restauración de las estructuras.

Ante la imposibilidad de trazar una sección que mantenga la linealidad de la bodega, dados los requiebros y recodos de las galerías, para conocer la cota se genera el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) a la altura del pavimento de la bodega (Figura 141).

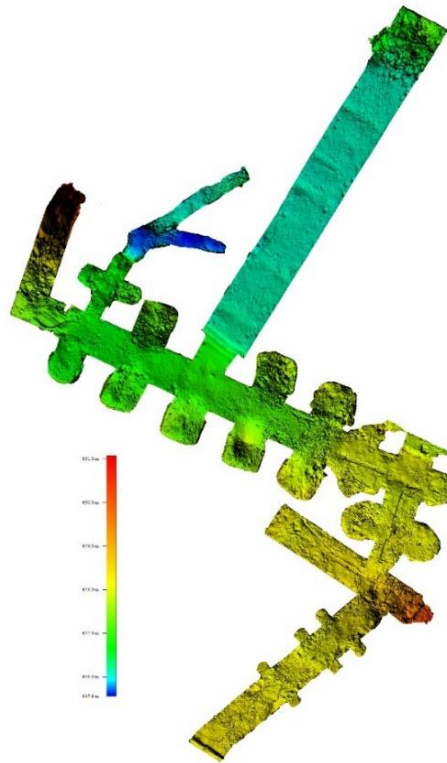


Figura 141. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del pavimento de la bodega.

Entre los productos obtenidos, podemos generar un visor 3D del modelo general o de cada galería individualmente. A tal fin, se disminuye la resolución del modelo para que el visor pueda ejecutarse en cualquier tipo de equipo informático. Sobre el modelo, al encontrarse escalado, se pueden tomar las medidas que se precisen. Además, permite obtener fácilmente cualquier sección en cualquier punto (Figura 142).

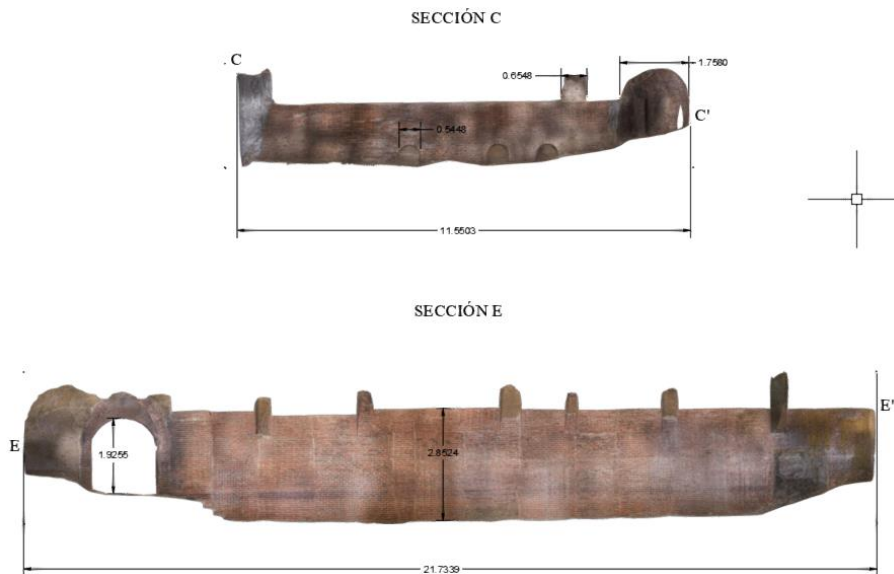


Figura 142. Ejemplos de secciones de la bodega en CAD.

Para trabajos técnicos más concretos, se genera una ortoimagen de la planta (Figura 143), así como algunas secciones de la estructura, de cara a su exportación a formato CAD y la creación de planimetrías.



Figura 143. Ortoimagen de las cubiertas de las galerías.

7. REPROCESO DE CASOS DE ESTUDIO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. REPROCESO DE CASOS DE ESTUDIO

Para llevar a cabo un estudio completo sobre la viabilidad de la técnica fotogramétrica en estructuras subterráneas es necesario el reproceso de los casos de estudio más relevantes expuestos anteriormente.

Este reproceso busca encontrar debilidades y fortalezas respecto a parámetros como la iluminación artificial y la georreferenciación en los casos de las Bodegas del Arrabal, Bodegas de Vicálvaro y el Pozo Viejo del Corral de Almaguer.

Las Bodegas del Arrabal se toman como referencia teniendo en cuenta la elevada extensión a virtualizar. También se comprueba si la técnica de captura de datos empleada (láser escáner y fotogrametría), junto con la iluminación artificial, mantiene la calidad de los resultados sin el apoyo del láser escáner. Por último, se profundiza en la posibilidad de georreferenciación de todo el modelo al completo, procesándose en un único bloque, teniendo en cuenta las capturas realizadas sobre la fachada principal a partir del sistema RTK del DJI Phantom 4 Pro.

Las Bodegas de Vicálvaro resultan objeto de estudio debido a la particularidad de la técnica de obtención de datos, la fotogrametría terrestre. La utilización de focos y antorchas LED portátiles guiadas y enlazadas al técnico virtualizador dictaminan la calidad de la textura. En este caso, la georreferenciación viene apoyada en los GPC obtenidos manualmente mediante el Receptor RTK GNSS. Se comprueba la viabilidad de la georreferenciación satelital incluso cuando el proyecto se ve ampliado y resulta necesaria una nueva toma de datos en una estructura cercana en diferentes días. Todo ello, de nuevo, procesando en bloque las diferentes áreas del proyecto, valorando así su posición relativa.

El Pozo Viejo del Corral de Almaguer refrenda las conclusiones sobre la georreferenciación, basada en las imágenes recogidas por el RTK del DJI Phantom 4 Pro, estando éstas a su vez sustentadas en GCP y en medidas manuales de distancia. Sirve como último punto de contraste en lo relativo a la técnica de iluminación artificial móvil enlazada a la cámara. También integra un nuevo bloque compacto de procesado de todas las imágenes aéreas y terrestres.

El reprocesado de los citados casos se realiza entre dos equipos, uno de mesa y uno portátil. Sus características son CPU Intel® Core™ i7-9700F, GPU Nvidia® Quadro P620 y RAM 64 GB; y CPU Intel® Core™ i9-12900H, GPU NVIDIA® GeForce RTX™ 3080 Ti y RAM 64 GB, respectivamente. El *'software'* utilizado es Agisoft Metashape en su versión 2.1.0. Se adjuntan los informes de los reprocesos generados en los Anexos II, III y IV.

El modo de trabajo consiste en orientar las imágenes y generar una malla en calidad alta con las imágenes alineadas para conseguir un "modelo original". Debido a la alta cantidad de imágenes se genera una alta densidad de polígonos y, en consecuencia, un modelo de excesivo peso. Posteriormente, se decima la malla original hasta conseguir un modelo en torno a 50 - 60 millones de polígonos sobre el que trabajar, denominado *'high poly'* (HP). La textura generada para el modelo HP será en 2 x 8.192 píxeles.

Por último, para la adecuada difusión y manejabilidad del modelo en su visor 'on-line' se reduce la malla HP a otra 'low poly' (LP), que se mantiene sobre 1.000.000 de polígonos y una textura 1 x 4.096 píxeles.

En el primero de los casos, el reproceso de las Bodegas del Arrabal (Figura 144), se procede a ubicar todas las imágenes, tanto aéreas como terrestres, en un mismo bloque. El número de imágenes aéreas asciende a 309 y las terrestres a 7.736. La orientación de las cámaras se realiza con los parámetros de precisión máxima y la preselección genérica activada. Además, se indica que los puntos clave por foto y los puntos de paso por foto serán 80.000 y 8.000, respectivamente.

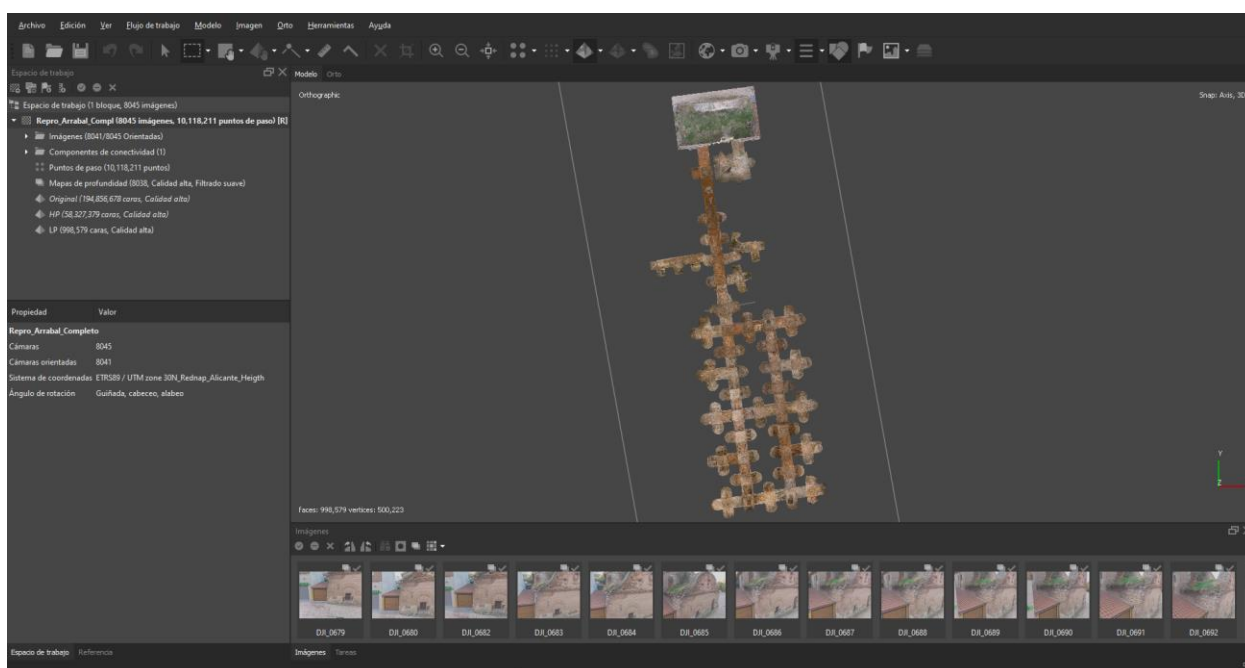


Figura 144. Reproceso Bodegas del Arrabal. Fuente: Elaboración propia.

Tras la orientación, se comprueba que han sido alineadas correctamente un total de 8.041 imágenes respecto a las 8.045 totales; se consigue, prácticamente, una alineación completa e integral entre la toma aérea y la terrestre.

Se concluye que la teoría descrita en la sección 5.1.2. *Soluciones*, apartado *B. Técnica de captura de datos, solape y continuidad* se ha aplicado correctamente, consiguiendo abarcar un área superior a 600 m² y recogiendo cada zona sin excepción del bien a documentar (Figura 145).

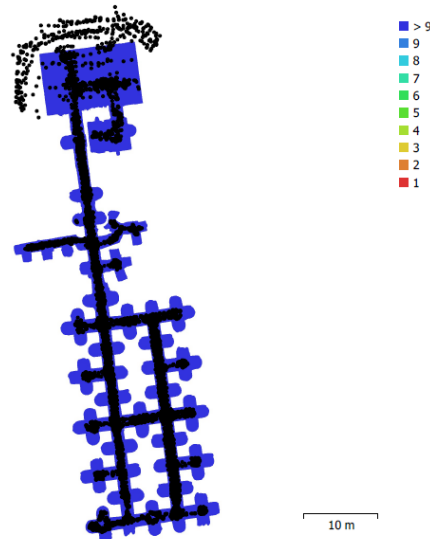


Figura 145. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, desde un punto de vista técnico del procesado, se aprecia la capacidad del ‘software’ de orientar imágenes con diferente distancia focal y con diferente posición de orientación de la captura (provocada por la adaptación de la toma de datos al medio subterráneo). Los datos recogidos por la Pentax K-50 muestran una oscilación de la distancia focal entre los 18 mm y los 24,28 mm. La captura predominante es la de 18 mm en una resolución de 3.264 x 4.928 y 4.928 x 3.264 píxeles, con un total de 3.562 y 3.338 imágenes, respectivamente.

Posteriormente, se convierte el sistema de coordenadas propio del UAV al sistema ETRS89 / UTM zona 30N en la que se encuentran ubicadas realmente las bodegas. Para la adaptación del sistema de coordenadas se toman como datos de partida únicos las coordenadas de cada imagen capturada por el UAV, es decir, 309 imágenes sobre las que se georreferencia y orienta el modelo completo (Figura 146).

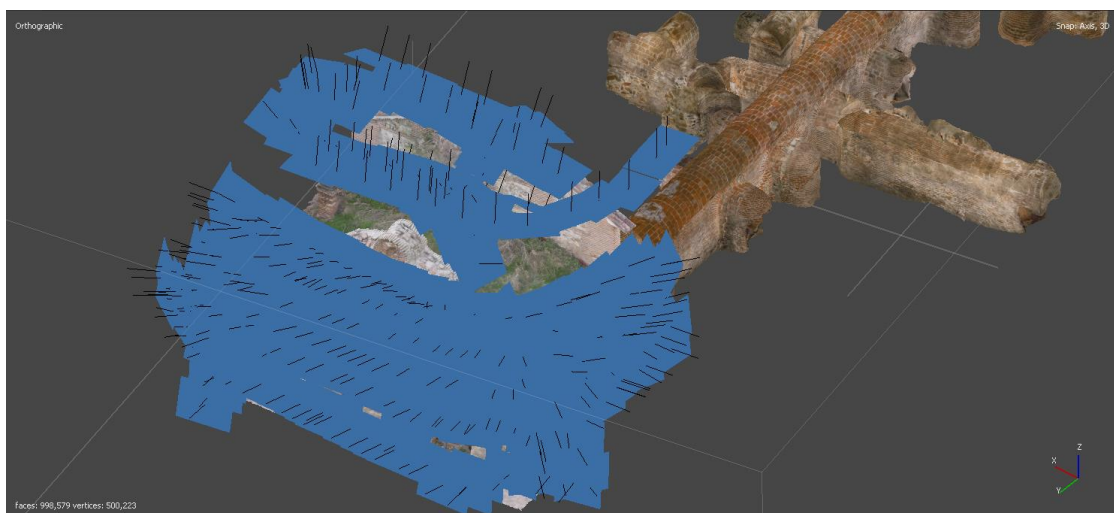


Figura 146. Toma de datos aérea. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, como se puede apreciar en una vista lateral del conjunto de las bodegas, existe una errada inclinación que determina la no horizontalidad del pavimento en sus secciones transversal y longitudinal (Figura 147) y en la estructura, como puede apreciarse en los tendeles y las llagas de la fachada (Figura 148).

Además, los datos recogidos mediante nivel láser y de burbuja, así como la planimetría de Sandoval (1991), confirman la discrepancia.



Figura 147. *Inclinación del modelo. Fuente: Elaboración propia.*



Figura 148. *Inclinación del modelo, detalle de tendeles y llagas. Fuente: Elaboración propia.*

Adoptando como válida la escala surgida a partir del posicionamiento de las imágenes del UAV (Figura 149), se obtiene una precisión relativa (verosimilitud entre el objeto real y el virtualizado) elevada. Respecto a la precisión absoluta (georreferenciación), el informe generado (Anexo II) arroja un error de 50,6 cm en X, 55,3 cm en Y, y 20,4 cm en Z (Figura 150). El error medio combinado es de 77,7 cm. Este error se debe a la falta de cobertura aérea de la zona, es decir, se necesita conseguir la totalidad de la superficie terrestre que corresponda al área subterránea virtualizada capturada mediante un UAV RTK.



Figura 149. Toma de datos aérea, planta.
Fuente: Elaboración propia.

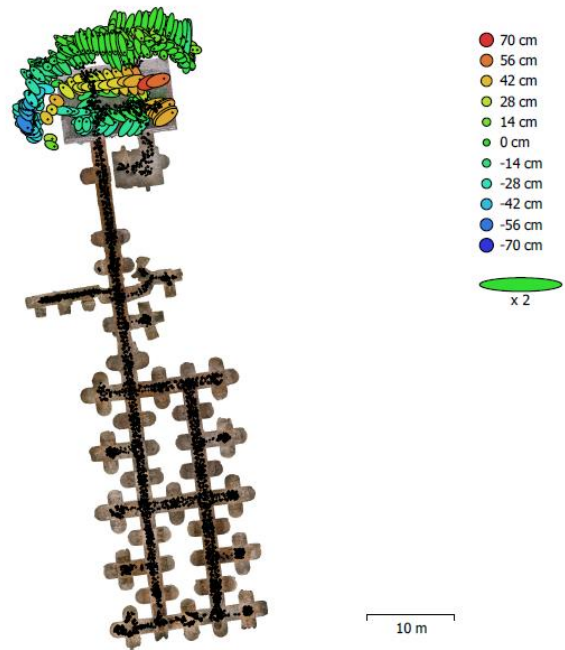


Figura 150. Posición de cámaras aéreas, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia.

La calidad de la textura generada en el modelo (Figura 151) indica que el método de iluminación artificial portátil mediante antorcha y foco LED ha dado un óptimo resultado. Esto confiere una homogeneidad constante a la textura a lo largo del modelo, existiendo en escasas ocasiones zonas sub o sobre expuestas, lo cual indica que el postprocesado y edición de imágenes ha sido el adecuado.



Figura 151. Textura 2 x 8 K en modelo HP. Fuente: Elaboración propia.

El reproceso de las Bodegas de Vicálvaro consiste en integrar en un único bloque las imágenes de las cuatro galerías iniciales y, además, añadir una quinta galería virtualizada con posterioridad (Figura 152). Todas las imágenes han sido obtenidas a partir de una toma de datos terrestre. El número de imágenes de las cuatro galerías principales es 4.223 y, el de la última, 900.

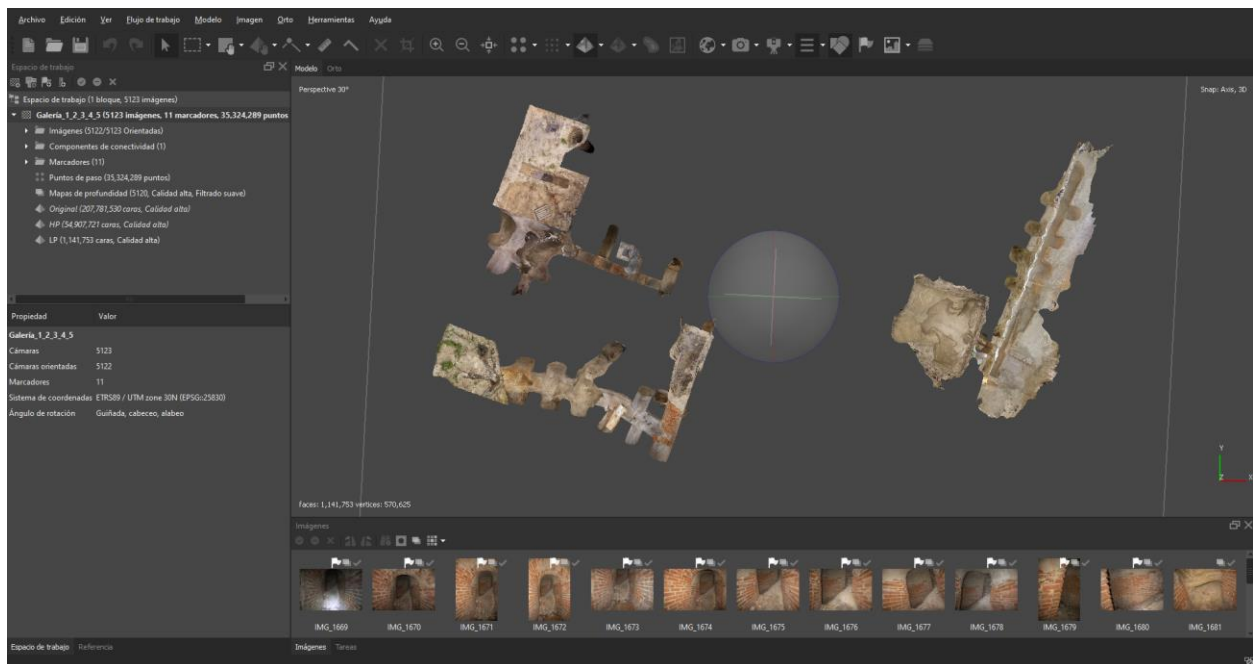


Figura 152. Reproceso Bodegas de Vicálvaro. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de imágenes totales utilizadas ha sido de 5.123, de las que se han alineado todas a excepción de una única imagen. En este caso, también se ha realizado la orientación de las mismas manteniendo los parámetros de precisión máxima y preselección genérica activados, junto con los puntos clave por foto y los puntos de paso, que han sido 80.000 y 8.000, respectivamente.

Nuevamente, la técnica de toma de datos ha dado un resultado fructífero en tanto que la orientación ha sido completa en un área de 390 m². Se han orientado las cuatro galerías iniciales por un lado y la quinta por otro, para unir las posteriormente (Figura 153). El programa ha organizado las imágenes independientemente de su distancia focal e, incluso, del tipo de cámara.

Para las cuatro galerías principales se ha utilizado la Pentax K-50, mientras que en la quinta galería ha sido la Canon EOS M100, oscilando entre 18 mm y 23,13 mm en la primera y 15 mm en la segunda. La resolución de las imágenes corresponde a 3.264 x 4.928 y 4.928 x 3.264 píxeles en la Pentax K-50 y a 6.000 x 4.000 y 4.000 x 6.000 en la Canon EOS M100. La distancia focal más utilizada ha sido la de 18 mm en 1.126 y 1.273 imágenes en las posiciones horizontal y vertical de la cámara.

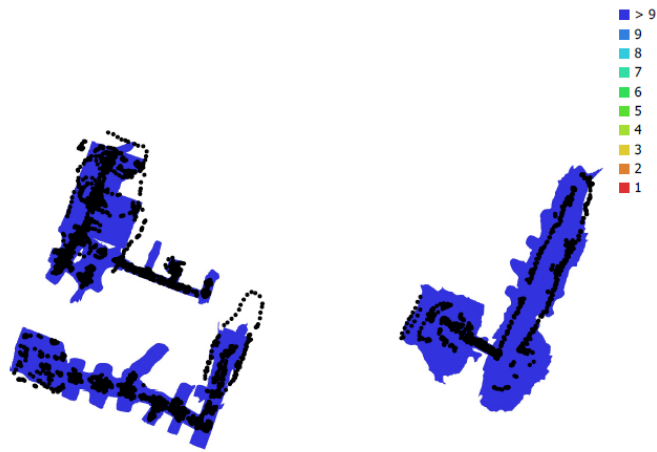


Figura 153. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de coordenadas se adapta al ETRS89 / UTM zona 30N, correspondiendo al de la ubicación de las galerías. Para adaptar el sistema de coordenadas se convierten los datos recogidos por el receptor RTK. En este caso, se recogen los puntos en torno a las embocaduras de las galerías, abarcando la mayor cantidad de superficie posible. En el acceso de las galerías 1 y 2 se toman 3 GCP (Figura 154), en torno a las galerías 3 y 4 se recogen 4 GCP (Figura 155) y, en la longitud de la galería 5, un total de 4 GCP (Figura 156).



Figura 154. GCP, galerías 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 155. GCP, galerías 3 y 4. Fuente: Elaboración propia.



Figura 156. GCP, galería 5. Fuente: Elaboración propia.

El reparto de los GCP en torno a la extensión del terreno a virtualizar (Figura 157) consigue el correcto posicionamiento del modelo georreferenciado. Además, en base a ellos, se fuerza la alineación de las imágenes respecto a su ubicación espacial. El error medio total, tal como refleja el informe del reproceso en el Anexo III, en base a los once GCP, es de 6 cm.



Figura 157. Posición de GCP, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la calidad de la textura conseguida a partir de las imágenes apoya el método de iluminación artificial portátil a partir de antorcha y foco LED. Como se aprecia en la Figura 158, la textura del modelo HP en 2 x 8.192 píxeles ha resultado de gran calidad, manteniendo la homogeneidad en la iluminación. Asimismo, tras la inspección visual de las imágenes, se comprende la edición de las mismas en cuanto a sombras e iluminación se refiere.



Figura 158. Textura 2 x 8 K en modelo HP. Fuente: Elaboración propia.

El último caso de estudio reprocesado ha sido el Pozo Viejo del Corral de Almaguer (Figura 159). Para aportar otro punto de vista respecto a las soluciones integrales posibles a la hora de resolver la virtualización de una estructura subterránea, se han tenido en cuenta los datos recogidos por el sistema RTK del UAV, secundados por los GCP obtenidos por el receptor RTK, junto con una medida de distancia tomada manualmente con flexómetro.

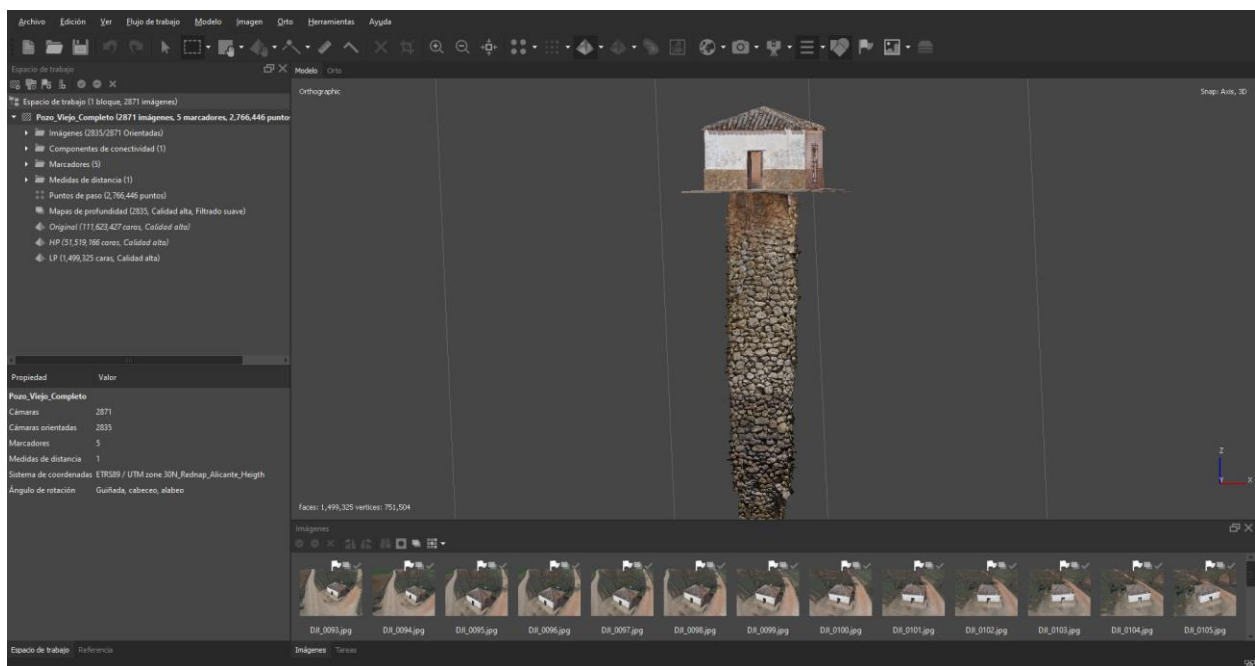


Figura 159. Reproceso Pozo Viejo de Corral de Almaguer. Fuente: Elaboración propia.

El número de imágenes aéreas utilizadas en esta ocasión ha sido de 159. Las imágenes terrestres ascienden a 2.712. La combinación de las mismas en un único bloque de procesado consigue una orientación casi total, a excepción de 36 imágenes. Estas imágenes se corresponden con tomas borrosas y desenfocadas, provocadas por la dificultad de la toma de datos del técnico colgado de una polea y afianzando su equilibrio con ayuda de una pértiga en el interior del pozo (Figura 160).



Figura 160. Detalle de imágenes borrosas y desenfocadas.

Por tanto, como se aprecia en la Figura 161 extraída del informe de procesamiento de Agisoft Metashape (Anexo IV), el solape entre imágenes confiere una recogida completa del bien virtualizado.

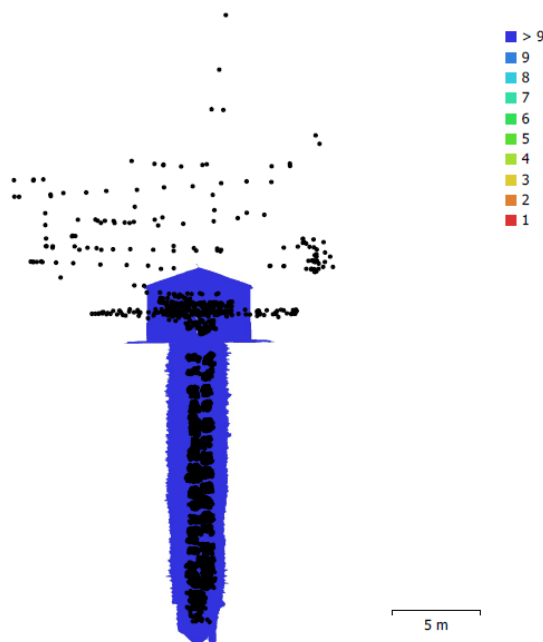


Figura 161. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Una vez más, el ‘software’ fotogramétrico es capaz de orientar imágenes con distinta distancia focal y con diferente posición de orientación de la captura. Las capturas recogidas por la Canon EOS M100 mantienen una distancia focal comprendida entre 15 y 16 mm mayoritariamente, entre 6.000 x 4.000 y 4.000 x 6.000 píxeles, a excepción de tres imágenes tomadas con una distancia focal de 28 mm.

El error medio combinado asciende a los 143,7 m. Sin embargo, en el desglose del error por coordenadas se puede comprobar que el error predominante se encuentra en el eje Z, con 143,67 m (Figura 162). Uno de las posibilidades de este gran error podría resultar de una errónea recepción de la señal en el RTK del UAV.

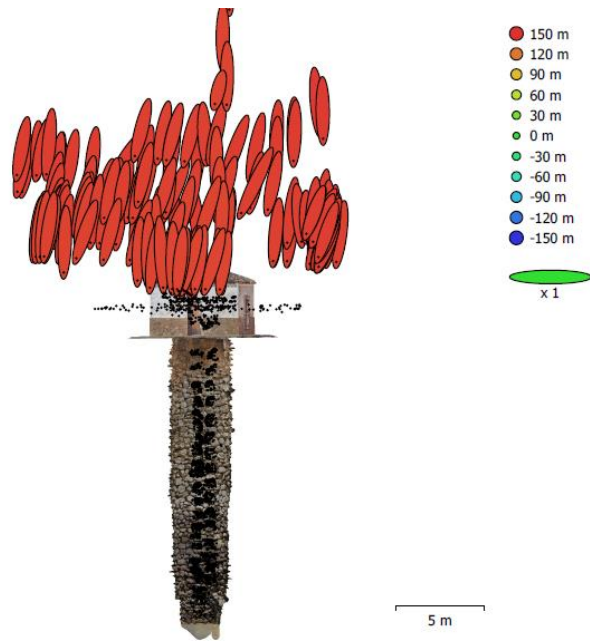


Figura 162. Posición de cámaras, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia.

Ante esta posibilidad, siempre resulta conveniente tomar GCP auxiliares que den soporte a la georreferenciación y al consiguiente escalado del modelo. Los tres GCP auxiliares rebajan el error medio a 26,5 cm. Además, todo ello se corrobora al aportar una medida de distancia tomada manualmente en el interior de la estructura (Figura 163), esta medida arroja un error de 4,4 mm. Por tanto, se concluye que el modelo queda georreferenciado y escalado solventando los problemas de cobertura iniciales. Con los datos aportados por los GCP se convierte el sistema de coordenadas propio del UAV al sistema ETRS89 / UTM zona 30N.



Figura 163. Medida de distancia y GCP. Fuente: Elaboración propia.

Por último, la calidad de la textura generada en el modelo (Figura 164) refuta la técnica de iluminación artificial portátil mediante antorcha y foco LED. Nuevamente, el resultado otorga homogeneidad en la iluminación en el tramo subterráneo. Asimismo, la edición de las imágenes en RAW (Figura 165) ha resultado ser un factor diferencial a la hora de su posterior alineado, consiguiendo extraer la información más oculta de la imagen, tratando las iluminaciones y sombras propias de cada toma.



Figura 164. Textura 2 x 8 K en modelo HP.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 165. Imagen RAW sin editar. Fuente:
Elaboración propia.

Para mostrar el resultado obtenido, se alojan en la plataforma web Sketchfab los modelos LP de los casos reprocesados. Sketchfab es una red social que sirve de repositorio de modelos 3D, a la vez que actúa como visualizador web de modelos tridimensionales. La publicación de los modelos 3D patrimoniales constituye el fin último de la digitalización: la divulgación y el acceso universal. Los enlaces web habilitados son los siguientes:

Bodegas del Arrabal, Talamanca de Jarama:

<https://sketchfab.com/3d-models/bodegas-del-arrabal-talamanca-del-jarama-1bc9b766e8fa42af8190676ae8d508d7>

Bodegas, Vicálvaro:

<https://sketchfab.com/3d-models/bodegas-de-vicalvaro-madrid-c4241a77b06b4648b8c13d1cfd4a2643>

Pozo Viejo, Corral de Almaguer:

<https://sketchfab.com/3d-models/pozo-viejo-corr-al-de-almaguer-toledo-7b7d0223f97642f3ab4f6a14bc2f52ff>

7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

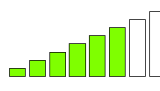
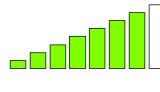
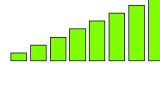
El análisis y el reproceso de los tres casos prácticos arrojan resultados concretos. Para facilitar su resumen se configura la Tabla 11. Se señalan los parámetros elegidos durante el reproceso y se evalúan los datos obtenidos en función de los resultados.

El resultado más evidente es el que implica a la técnica de toma de datos, a la iluminación móvil artificial y al postprocesado de imágenes. La completa alineación de imágenes en un único bloque, manteniendo activado el parámetro de preselección genérica durante la orientación, indica que cada imagen se ha visto correspondida respecto a su inmediatamente anterior y posterior en más de un 80 %. En consecuencia, la técnica y la orientación de la toma ha resultado adecuada.

Todo ello, además, ha sido posible gracias a la homogeneidad lumínica mantenida durante la toma subterránea. Según los parámetros de orientación de las imágenes de los puntos clave por foto y los puntos de paso por foto, 80.000 y 8.000 respectivamente, se corrobora que el ‘software’ ha encontrado dicha información. Por tanto, las imágenes mantienen una correcta iluminación y han sido apoyadas por un correcto postprocesado en favor de la supresión de sombras.

El último factor que sustenta la elección de la antorcha y el foco LED móviles y acoplados a la cámara y al técnico es la calidad conseguida en la textura final. Dicha textura se aprovecha de la óptima edición de imágenes para conseguir un resultado nítido e iluminado en su totalidad de manera uniforme sin hallar zonas oscurecidas o en sombra.

Tabla 11. Parámetros elegidos en el reproceso de los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

| Casos de estudio – Reprocesos | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|---|------------------------|---|--------------------|---|-------------------|---|
| Proyectos | Datos | | Iluminación artificial | | Georreferenciación | | Proceso en bloque | Resultado |
| Bodegas del Arrabal | Láser | ✗ | Antorcha Foco LED | ✓ | UAV RTK | ✓ | ✓ |  |
| | Aérea | ✓ | | | Receptor RTK | ✗ | | |
| | Terrestre | ✓ | | | Medida manual | ✗ | | |
| Bodegas de Vicálvaro | Láser | ✗ | Antorcha Foco LED | ✓ | UAV RTK | ✗ | ✓ |  |
| | Aérea | ✗ | | | Receptor RTK | ✓ | | |
| | Terrestre | ✓ | | | Medida manual | ✗ | | |
| Pozo Viejo de Corral de Almaguer | Láser | ✗ | Antorcha Foco LED | ✓ | UAV RTK | ✓ | ✓ |  |
| | Aérea | ✓ | | | Receptor RTK | ✓ | | |
| | Terrestre | ✓ | | | Medida manual | ✓ | | |

Respecto a la toma de datos, la cantidad de puntos de paso obtenidos en cada caso respecto al número de imágenes de partida ha determinado una nube compacta. Se ha conseguido confeccionar, a partir de los mapas de profundidad, una malla lo suficientemente detallada (sin llegar a la calidad extra alta de procesado) como para validar la fotogrametría pura en entornos subterráneos. Los datos citados se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12. Relación entre número de imágenes, puntos de paso y polígonos de la malla original. Fuente: Elaboración propia.

| | Nº de imágenes | Puntos de paso | Nº de polígonos |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Bodegas, Arrabal | 8.045 | 10.118.211 | 194.856.678 |
| Bodegas, Vicálvaro | 5.123 | 35.324.289 | 207.781.530 |
| Pozo Viejo, Corral de A. | 2.871 | 2.766.446 | 111.623.427 |

En cuanto a la georreferenciación, se han propuesto tres alternativas. La primera, actuando únicamente con los datos RTK-UAV; la segunda, a partir de los datos RTK-GCP; y la tercera, integrando las dos anteriores junto con una medida de distancia. A tenor de los resultados podemos concluir que:

- Optando por una georreferenciación RTK-UAV, se deben capturar imágenes aéreas de toda la superficie que ocupe la planta del bien subterráneo para evitar descompensaciones en el traslado de coordenadas y mitigar el error.
- Apostando por una solución RTK-GCP se han de perimetrar los accesos al subsuelo y añadir más registros de puntos de seguridad a lo largo de la superficie bajo la que se aloje.
- La solución más completa consiste en integrar el sistema RTK-UAV junto con el RTK-GCP por si, en alguno de los casos, la señal del receptor no es la adecuada y poder discretizar el error. Asimismo, añadir medidas de distancia manuales confiere verosimilitud a la escala otorgada por dichos sistemas.

8. CONCLUSIONES

El itinerario cursado en el Máster en Investigación e Innovación en Arquitectura (MIIA) implicaba ligar dicha investigación e innovación a la “intervención sostenible en el patrimonio arquitectónico, urbano y territorial”. Por ende, se han enlazado los conceptos de documentación, acceso universal, digitalización, protección y conservación de entornos y espacios naturales, entre otros.

El presente Trabajo de Fin de Máster se concibió con el objetivo principal de estudiar de manera exhaustiva la viabilidad de la técnica fotogramétrica pura aplicada a entornos subterráneos y en condiciones lumínicas adversas. Se ha valorado la teoría desde el punto de vista de la evolución de la fotogrametría hasta nuestros días y se ha puesto en práctica en casos de estudio concretos.

A través de la revisión de la literatura, la investigación y el análisis de dichos casos prácticos se puede determinar que se han cumplido los objetivos:

- **Evaluar la técnica fotogramétrica.** La orografía propia de cada caso conlleva soluciones específicas para la virtualización fotogramétrica del entorno.
- **Resolver la iluminación de manera artificial.** La iluminación artificial influye directamente en la calidad de las texturas finales. Asimismo, la técnica de postprocesado de imágenes resulta un factor diferencial.
- **Solventar la georreferenciación del modelo 3D hipogénico.** Se consigue trasladando las coordenadas desde el exterior de modo directo mediante sistemas RTK-UAV o de modo indirecto a través de RTK-GCP.

Por otra parte, tras el estudio bibliográfico, se concluye que el significativo avance tecnológico ha mejorado la calidad y la precisión de los datos capturados en entornos subterráneos. Especial mención merecen los sensores de imagen de baja luminosidad, los sistemas de iluminación adaptativa y los algoritmos de procesamiento de imágenes.

La investigación ha demostrado, mediante la validación experimental, la eficacia y precisión de la técnica fotogramétrica en situaciones reales. Se ha evaluado la viabilidad de la técnica en diferentes contextos junto con la identificación de áreas de mejora.

Además, se ha comprobado tanto teórica como prácticamente la importancia de la integración de diferentes tecnologías. Si bien la fotogrametría defiende su independencia con resultados más que admirables, destaca la importancia de integrar diversas tecnologías como el LiDAR y las diferentes posibilidades de sistemas de posicionamiento RTK. Esta combinación tecnológica permite compensar las limitaciones individuales y conformar una representación más precisa del entorno subterráneo.

En resumen, este trabajo infiere la importancia y la viabilidad de la fotogrametría aplicada a entornos subterráneos, remarcando su potencial en una amplia gama de aplicaciones prácticas, tales como actividades arqueológicas, mineras y geológicas, además de la protección, preservación y conservación del patrimonio subterráneo.

9. LÍNEAS FUTURAS: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

Entre los desafíos y oportunidades, en líneas generales, existen tres campos de investigación: la toma de datos, el procesado de datos y el postprocesado y divulgación de los resultados.

En primer lugar, en lo referente a la **toma de datos**, surgen varias líneas a explorar: combinación de técnicas, sensores de imagen especializados, sistemas de iluminación adaptativa y estabilización y posicionamiento preciso.

Por un lado, la combinación de la fotogrametría con la tecnología LiDAR aporta densidad a la nube de puntos generada, llegando donde la captura de imágenes no alcanza. Por otro, la integración de UAVs específicamente de aplicación subterránea, como el Elios 2 de Flyability, permite automatizar y acelerar la toma de datos en entornos de difícil acceso para la figura humana.

Respecto a los sensores de imagen especializados en documentación fotográfica subterránea, será necesaria la aparición de una concienciación social. En esta corriente, las grandes marcas de cámaras fotográficas deben ver una oportunidad de mercado para apostar por su desarrollo. Entre las futuras mejoras en este ámbito cabría esperar la aparición de sensores de imagen con mayor sensibilidad ISO y de mayor HDR.

Sobre los sistemas de iluminación avanzada, podría surgir una tecnología inteligente que adapte la dirección e intensidad del foco en función de las características recogidas e interpretadas del entorno. Por ejemplo, sistemas de iluminación LED inteligente y sistemas de visión nocturna de alta potencia.

La estabilización y el posicionamiento se torna fundamental en cuanto a la georreferenciación y escala se refiere. La mejora de estos sensores, por propia inercia, permitirá la captura de datos más precisos y de mayor calidad incluso en movimiento en entornos subterráneos. Estos avances podrían constituir mejoras en los sensores de estabilización giroscópica y en los sistemas RTK.

En segundo lugar, en el **procesado de datos**, se debe diferenciar entre un procesado de datos entendido como trabajo de gabinete y un procesado de datos en tiempo real.

Con el avance de la inteligencia artificial (AI) y el aprendizaje automático, junto con la evolución del propio ‘software’ de procesado, se están desarrollando algoritmos más sofisticados y potentes para el tratamiento y procesamiento de imágenes. Entre sus ventajas destacan la reducción del ruido y la consecuente generación de modelos 3D más nítidos.

Otra de las ventajas que se está instalando influye directamente en la velocidad de procesado. ‘Softwares’ como Agisoft Metashape o Pix4D habilitan la posibilidad de lanzar los procesados en “la nube”, es decir, servidores de la propia marca que realizan el trabajo a una velocidad mayor de la que cabe esperar en un procesado local. En palabras de Robert Greenhalgh (2024): “con el reconocimiento y la digitalización de objetos respaldados por AI, el proceso de documentación y procesado tal como lo conocemos actualmente quedará obsoleto”.

Los BMM son el presente y el futuro de los sistemas de mapeo móvil en tiempo real. Estos sistemas están formados por un equipo de 'hardware' y 'software' lo suficientemente potente como para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Permiten la visualización de estos datos mientras son capturados: la utilización de estos sistemas permite la monitorización en tiempo real en diversas áreas de estudio.

Por ejemplo, el monitoreo y la evaluación de la calidad del agua subterránea y la gestión de la biodiversidad tendrá un gran impacto en la conservación del medio ambiente. Asimismo, como se ha citado anteriormente, la monitorización de túneles y galerías es un factor clave en proyectos de minería e ingeniería civil, pues aporta una comprensión del paisaje subterráneo que conseguirá proyectos más precisos y eficientes.

La tendencia de miniaturización de sensores y equipos fotogramétricos está desarrollando soluciones más compactas, permitiendo una mayor flexibilidad y facilidad de uso en trabajo de campo. La delgada línea que separa los diferentes MMS y la necesidad de conseguir una combinación integral de técnicas ha llevado a Pix4D a la vanguardia de las soluciones en este campo.

Pix4D ha conseguido combinar la gran cámara de iPhone junto con la tecnología LiDAR integrada en los últimos modelos para la captura de datos de modo automático (LiDAR SLAM). Las capacidades del 'smartphone' se combinan con el sistema RTK y el 'software' de Pix4D se encarga de ensamblarlo todo (Figura 166). Según Cristoph Strecha (2024), fundador y CEO de Pix4D, utilizando un EMLID Reach RX durante una digitalización en superficie se ha conseguido una precisión absoluta entre 1 y 4 cm.

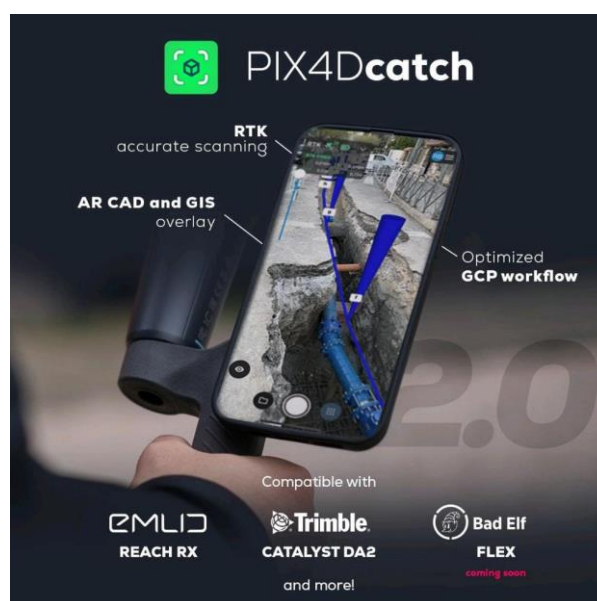


Figura 166. Solución de MMS diseñada por Pix4D. Fuente: Blog Pix4D (2024).

Por último, el futuro del **postprocesado** y su ligazón a la **divulgación de resultados** conllevará el desarrollo de herramientas que permitan mejorar la comprensión, interpretación, visualización y presentación de los modelos 3D generados. Las vías de desarrollo incluirían los modelos interactivos: AR, VR, y SIG.

En el marco de proyectos patrimoniales, es latente la necesidad de implicar a las instituciones públicas para que sean parte del proceso y aprovechen sus resultados para la protección de dichos entornos.

Surge la importancia de fomentar el trabajo colaborativo y favorecer la comunicación entre equipos. Es incuestionable la puesta en valor de un equipo de trabajo multidisciplinar que alcance los cánones de verosimilitud y rigor histórico en cada proyecto. En este aspecto, en la Galería 5 del caso de estudio de las Bodegas de Vicálvaro, 3D Stoa Patrimonio y Tecnología S.L. aúna las técnicas de postprocesado y divulgación histórica, como puede apreciarse en el resultado de la propia reconstrucción (Figura 167):

<https://sketchfab.com/3d-models/bodega-de-vicalvaro-madrid-s-xviii-7b8f288133af454fa5774813e4747b95>

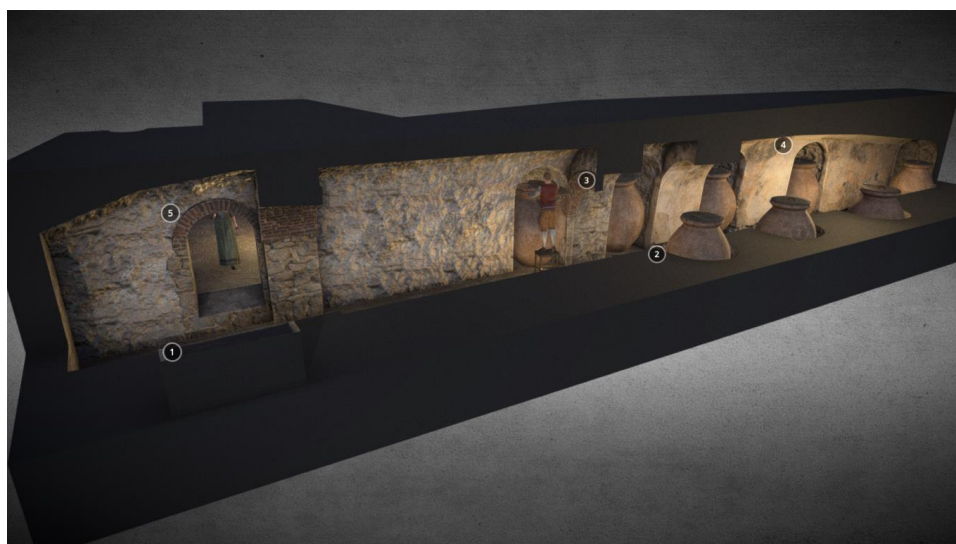


Figura 167. Reconstrucción de la Bodega 5 perteneciente a Bodega de Vicálvaro, Madrid (s. XVIII).
Fuente: Sketchfab de 3D Stoa Patrimonio y Tecnología S.L. (2021).

10. REFLEXIÓN PERSONAL

En aspectos generales, la realización del MIIA me ha aportado la capacidad de análisis crítico que requiere la búsqueda de información y su aprendizaje. Los conocimientos adquiridos, en gran parte, han consistido en valorar la profundidad de cada investigación sobre la materia objeto de estudio, además de conseguir una capacidad de síntesis y extracción de la información relevante de la bibliografía entrelazada con el caso particular.

Se espera que las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo contribuyan al avance de la investigación en futuros proyectos dentro de este ilusionante ámbito de estudio.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft, L. L. (2024). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition. *Version 2.1, 11*. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf
- Albertz, J. (2002). Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7), 19-25.
- Alessadri, L., Baiocchi, V., Del Pizzo, S., Rolfo, M., y Troisi, S. (2019). Photogrammetric Survey with Fisheye Lens for the Characterization of the la Sassa Cave. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 422, 25-32.
- Almagro Gorbea, A. (1988). Fotogrametría y representacion de la Arquitectura. *Actas del X Symposium Internacional de Fotogrametría Arquitectónica, Granada*.
- Andreev, S. (2018). *Hotei Russia*. Accedido el 1 de marzo de 2024, de <https://www.hotei-russia.com/theheartofmalta>
- Aragon, S. (8 de agosto de 2023). *dfotografia.com*. Accedido el 5 de mayo de 2024, de <https://dfotografia.com/la-primer-foto-vista-desde-la-ventana-en-le-gras-de-nicephore-niepce/>
- Arranz Justel, J. (2013). Tesis Doctoral. Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial. https://oa.upm.es/15056/1/JOSE_JUAN_ARRANZ_JUSTEL_B.pdf
- Banfi, F. (2020). HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), 16-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/var.2020.12416>
- BCRA. (10 de noviembre de 2002). Accedido el 10 de mayo de 2024, de <https://bcra.org.uk>: <https://bcra.org.uk/surveying/>
- Begleiter, S. (2014). 50 Lighting Setups for Portrait Photographers: Easy-To-Follow Lighting Designs and Diagrams. *Amherst Media*, 2.
- Benavides López, J. (2017). Nuevas tecnologías en la documentación del patrimonio: La alcazaba de Guadix-El castillo de Piñar. *Tesis Doctoral, Universidad de Granada*.
- Benton, D., Seymour, J., Boltz, M., Raffaldi, M., y Finley, S. (2017). Photogrammetry in underground mining ground control - Lucky Friday mine case study. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, 587-598. https://doi.org/https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1704_39_Benton
- Bonneval, H. (1972). *Photogrammétrie générale: Enregistrement photographique des gerbes perspectives (Vol. 1)*. Eyrolles.

- Brandi, C., & De Angelis, G. (6 de Abril de 1972). Carta di Restauro. *Circolare(117)*. Roma, Italia. Ministerio della Pubblica Istruzione. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ge-iic.com/files/Cartasydocumentos/Carta_del_restauero.pdf
- Buill Pozuelo, F., Nuñez Andrés, M., & Rodríguez Jordana, J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. ISBN: 84-8301-671-0.
- Cardozo, T., & Papadopoulos, C. (2021). Heritage Artefacts in the COVID-19 Era: The Aura and Authenticity of 3D Models. *Open Archaeology*, 7(1), 519-539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/opar-2020-0147>
- Carta de Amsterdam. (Octubre de 1975). Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/17.carta-europea-patrimonio.pdf>
- Carta de Atenas. (1931). Carta de Atenas para la restauración de monumentos históricos. *Convención de Monumentos de Arte e Historia. Conferencia internacional de Atenas, Grecia*. https://www.mcu.es/patrimonio/docs/MC/IPHE/Biblioteca/carta_de_atenas.pdf
- Carta de Burra. (1979). Carta para la conservación de lugares de valor cultural. *ICOMOS Australia*. https://www.patrimonio.go.cr/quienes_somos/legislacion/leyes_reglamentos/Carta%20de%20Burra.pdf
- Carta de Cracovia. (2000). Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido. *Preámbulo*. https://www.patrimonio.go.cr/quienes_somos/legislacion/leyes_reglamentos/Carta%20de%20Cracovia%20%202000.pdf
- Carta de Europa. (1975). Carta europea del patrimonio arquitectónico. *Amsterdam: Instituto del Patrimonio Cultural de España*.
- Carta de Nápoles. (8 de Octubre de 1999). Rilievo Architettonico. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.italianostraeducazion e.org/wp-content/uploads/2019/01/004_Carta_di-Napoli.pdf
- Carta de Venecia. (1964). Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios. *II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de monumentos históricos*. https://irpmzcc2.org/upload/secciones_archivos/02-carta-de-venecia-1964_201901041854.pdf
- Carta para Interpretación. (2008). ICOMOS. Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural. *Ratificada por la 16º Asamblea General del ICOMOS, Quebec (Canadá), el 4 de octubre de 2008*. Accedido el 13 de junio de 2024, de https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/interpretation_sp.pdf
- Chang, L., Niu, X., Liu, T., Tang, J., y Qian, C. (2019). GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization. *Remote Sensing*, 11(9), 1009.

- Cía, J., & Fuentes, Á. (2000). Notas sobre la conversión digital de colecciones fotográficas antiguas. (16), 243-256.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 95, 79-97.
- Comité ICOM-CC. (22-26 de Septiembre de 2008). Terminología para definir la conservación del patrimonio cultural tangible. *XV Conferencia Trienal*. New Delhi.
- Consejo de Europa. (1985). Convención para la salvaguardia del patrimonio arquitectónico de Europa. *Convención de Granada*. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/1985-convencion-granada.pdf>
- De Waele, J., Fabbri, S., Santagata, T., Chiarini, V., Columbu, A., y Pisani, L. (2018). Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave. *Geomorphology*, 319, 47-61.
- Department of Geography (2023). *GPS and GNSS for geospatial professionals*. College of Earth and Minerals Sciences, PennState. Accedido el 1 de julio de 2024 de <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845>
- Ehle, M. (1901). *Mines and Minerals*.
- Ellum, C., & El-Sheimy, N. (2000). The development of a backpack mobile mapping system. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B2; Part 2), 184-191.
- Ellum, C., & El-Sheimy, N. (2001). Portable mobile mapping. *In International Conference—New Technology for a New Century, FIG Working Week*.
- El-Sheimy, N. (1996). A mobile multi-sensor system for GIS applications in urban centers. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 95-100.
- Farella, E., Menna, F., Nocerino, E., Morabito, D., Remondino, F., y Campi, M. (2016). Knowledge and valorization of historical sites through 3D documentation and modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 255-262.
- FARO. (2024). Accedido el 3 de julio de 2024, de www.faro.com: <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/GeoSLAM-Geospatial-Technology>
- Flyability. (2021). Accedido el 5 de abril de 2024, de www.flyability.com: <https://www.flyability.com/es/elios-2>
- Flyability. (2022). Accedido el 5 de abril de 2024, de www.flyability.com: <https://www.flyability.com/elios-3>
- Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J., y Carbonneau, P. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and Landforms*, 38(4), 421-430.

- García García, B. (2015). *Nuevas tecnologías en la documentación gráfica del patrimonio religioso*. Escuela Politécnica Superior de Zamora. Universidad de Salamanca.
- García Bustos, M., Rivero, O., García Bustos, P., y Mateo Pellitero, A. (2023). From the cave to the virtual museum: accessibility and democratisation of franco-cantabrian palaeolithic art. *Virtual Archaeology Review*, 14(28), 54-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/var.2023.17684>
- García Gago, J., González Aguilera, D., Gómez Lahoz, J., y San José Alonso, J. (2014). A Photogrammetric and Computer Vision-Based Approach for Automated 3D Architectural Modeling and Its Typological Analysis. *Remote Sensing*, 6(6), 5671-5691. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs6065671>
- García Martín, A. (2011). Apuntes de la asignatura Ampliación de Topografía Minera. *IT Minas, Curso 3º, Especialidad en Explotación de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena*. <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=78&topic=3>
- Gobierno de España. (1985). Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. <https://www.boe.es/eli/es/l/1985/06/25/16>
- Gonzalez Aguilera, D. (2018). *Procesamiento avanzado de imágenes*. Máster Universitario en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura por la Universidad de Salamanca. <https://www.usal.es/master-geotecnologias-cartograficas-en-ingenieria-y-arquitectura>
- González Varas, I. (2018). *Conservación del Patrimonio Cultural: teoría, historia, principios y normas*. Cátedra.
- Greenhalgh, R. (16 de mayo de 2024). *Pix4D*. Accedido el 20 de agosto de 2024, de <https://www.pix4d.com/>: Blog. <https://hubs.li/Q02M2Xyn0>
- Grussenmeyer, P., Alby, E., Landes, T., Koehl, M., Guillermin, S., Hullo, J., . . . Smigiel, E. (2012). Recording approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and terrestrial laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences(XXXIX-B5)*, 553-558. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-553-2012>
- GTBibérica*. (2020). Accedido el 10 de junio de 2024, de <https://gtbi.net:https://gtbi.net/ultracam-panther/>
- Guía de Malta*. (2017). <https://guiademalta.com/derrumbamiento-ventana-azul-azure-window>
- Hammer Missions*. (2023, 25 de abril). Accedido el 5 abril de 2024, de www.hammermissions.com:https://www.hammermissions.com/post/accuracy-types-drone-data
- Helava, U. V. (14-18 de March de 1988). Object-space least-squares correlation. *In ACSM and American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Convention. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.*, 54, 71.

- Hobrough, G. L. (1978). Correlación digital en línea. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 46, 79-86.
- Huttenlocher, D., Klanderma, G., y Rucklidge, W. (1993). Comparing images using the Hausdorff distance. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 15(9), 850-863.
- ICOMOS. (1996). Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites. Londres.
- Itani, O., & Hollebeek, L. (2021). Light at the end of the tunnel: Visitors' virtual reality (versus in-person) attraction site tour-related behavioral intentions during and post-COVID-19. *Tourism Management*, 84, 104290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tourman.2021.104290>
- Joaquín Mateo, F., & Lozano del Pozo, C. (2014). Comparativa con técnicas GNSS y Mobile Mapping de un inventario de elementos físicos y geométricos.
- Jordan, J. H. (2017). Modeling Ozark Caves with structure-from-motion photogrammetry: an assessment of stand-alone photogrammetry for 3-dimensional cave survey. <http://scholarworks.uark.edu/etd/2406>
- Karkazi, E., Athanassiou, A., Darlas, A., Tokmakidis, P., Tzimtzimis, E., Chatziparadeisi, V., . . . Bochtis, D. (2024). Beyond the walls: the design and development of the Petralona Cave virtual museum utilising 3D technologies. *Virtual Archaeology Review*, 15(30), 80-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/var.2024.20014>
- Kasser, M., & Egels, Y. (2002). *Digital Photogrammetry* (Vol. 11). London: Taylor & Francis.
- Kearsey, T., Whitbread, K., Arkley, S., Finlayson, A., Monaghan, A., McLean, W., . . . Campbell, S. (2017). Creation and delivery of a complex 3D geological survey for the Glasgow area and its application to urban geology. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 108(2-3), 123-140. <https://doi.org/10.1017/S1755691018000270>
- Kelly, R., McConnell, P., y Mildenerger, S. (1977). The Gestalt Photomapping System. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 43, 1407-1417.
- Koré Formación online en Patrimonio y Tecnología. (2022). *Curso Optimización y postproceso de modelos 3D fotogramétricos*. Accedido el 20 de mayo de 2024 de <https://koreformacion.com/>
- Kwak, E. (2013). Automatic 3D building modelo generation by integrating LiDAR and aerial images using a hybrid approach. *Doctoral thesis, University of Calgary*. Calgary, Canada. <https://prism.ucalgary.ca/items/b593d567-0caa-4a10-8789-f39a1fa8dfdc>
- Letellier, R., Schmid, W., y LeBlanc, F. (2007). Guiding Principles Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places. *The Getty Conservation Institute*, 36-38.

- Linder, W. (2006). *Digital photogrammetry: A Practical Course*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Manzini, L. (2011). El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural* (Nº6), 27-42.
- Martín Rodríguez, F. (2014). Nuevos Métodos para la Fusión de Exposiciones en Imágenes de Alto Margen Dinámico.
- McGhee, K. (2004). *Automated Pavement distress collection techniques*. Transportation Research Board.
- Mosaic. (2023). Accedido el 3 de julio de 2024, de www.mosaic51.com: <https://www.mosaic51.com/products/mosaic-xplor/>
- Muñoz Viñas, S. (2003). *Teoría contemporánea de la restauración*. Editorial Síntesis.
- Ninot, J. (2017). SLAM-based Mobile Mapping System. *VIAMETRIS*. https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/2018/06/Success_Story_Viametris_vMS3D.pdf
- Okay, U., Telling, J., Claig L., G., y Dietrich, W. (2019). Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications. *Earth-Science Reviews*, 198, 102929. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102929>
- Pereira Uzal, J. (2013). *Gestión del color en proyectos de digitalización: fundamentos y estrategias para la fidelidad del color*. Marcombo.
- Pereira Uzal, J. (2024). *Digitalización y Preservación del Patrimonio Cultural*. Germany: Books on Demand. ISBN: 9788413734453.
- Pérez Álvarez, J. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Universidad de Extremadura. <http://redgeomatica.rediris.es/cartoprofesores/Fotogrametria/ApuntesFotogrametria3.pdf>
- Pérez Arias, B. (2018). *Cámaras. Calidad y rendimiento en fotogrametría*. Máster Universitario en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Salamanca. <https://www.usal.es/master-geotecnologias-cartograficas-en-ingenieria-y-arquitectura>
- Perfetti, L., Polari, C., y Fassi, F. (2017). Fisheye photogrammetry: tests and methodologies for the survey of narrow spaces. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(W3), 573-580.
- Pistellato, M., Fatima, T., y Wimmer, M. (2023). Exploiting light polarization for deepHDR imaging from a single exposure. *Sensors*, 23(12), 53-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23125370>
- Pix4D. (24 de noviembre de 2021). Accedido el 8 de abril de 2024, de www.pix4d.com: <https://www.pix4d.com/es/blog/inspeccion-de-alcantarillas-subterranas/>

- Plan, L., & Xaver, A. (2010). Geomorphologische untersuchung und genetische interpretation der Dachstein-Mammuthöhle (Österreich). *Die Höhle*, 61(1-4), 18-38.
- Polidori, L. (2020). On Laussedat's contribution to the emergence of photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 893-899. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-893-2020>
- Puente, I., González Jorge, H., Martínez Sánchez, J., y Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127-2145.
- Pukansa, K., Bartoš, K., Bella, P., y Sabová, J. (2017). Comparison of non-contact surveying technologies for modelling underground morphological structures. *Acta Montanistica Slovaca*, 22(3).
- Roberts, J. (2004). Exploratory visualization using bracketing. *In Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, 188-192.
- Rodríguez-González, P., Nocerino, E., Menna, F., Minto, S., y Remondino, F. (2015). 3D surveying & modeling of underground passages in WWI fortifications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 40(5/W4), 17-24.
- Roncat, A., Dublyansky, Y., Spötl, C., y Dorninger, P. (2011). Full-3D surveying of caves: a case study of Märchenhöhle (Austria). *Proceedings of the International Association for Mathematical Geosciences (IAMG 2011)*.
- Rottensteiner, F. (2003). Automatic generation of high-quality building models from Lidar data. *IEEE CG&A*, 23(6), 42-51.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., y Kubik, K. (Sept. de 2005). Automated delineaton of roof lanes from LiDAR data. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Whorkshop "Laser scanning 2005"*, 221-226.
- Sadurní, J. (20 de febrero de 2024). *nationalgeographic.com*. Accedido el 3 de abril de 2024, de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/louis-daguerre-mago-imagen-precursor-fotografia_14907#google_vignette
- Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAMbased mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*, 10(4), 317-339.
- Sánchez Sobrino, J. (2006). Introducción a la fotogrametría. *ETSI Caminos, Canales y Puertos*, 58.
- Sandoval, J. (1991). Levantamiento planimétrico de la Bodega del Arrabal.
- Santos Nascimento, A., Silva de Souza, V. G., Oliveira Dantas, D., y Trinchão Andrade, B. (2024). CP HDR: A feature point detection and description library for LDR and HDR images. *arXiv e-prints*, arXiv-2403, 19935.

- SBG SYSTEMS. (2023). Accedido el 3 de julio de 2024, de www.sbg.systems.com: <https://www.sbg-systems.com/news/slam-mobile-mapping/>
- Scaioni, M., Barazzetti, L., Giussani, A., Previtali, M., Roncoroni, F., y Alba, M. (2014). Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation. *Earth Science Informatics*, 7, 83-95.
- Schenk, T. (1999). *Digital Photogrammetry*.
- Schenk, T., & Greenfeld, J. S. (1989). *Experiments with edge-based stereo matching* (Vol. 55(12)). Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Shiode, N. (2001). 3D urban models: recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal* 52 (3), 263-269.
- Smith, R., & Cheeseman, P. (1986). On the representation and estimation of spatial uncertainty. 4, 56-68.
- Snavely, N., Seitz, S., y Szeliski, R. (2007). Modelling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision* 80, 189-210.
- Sterp Moga, E., Hernández Muñoz, Ó., y Sánchez Ortiz, A. (2021). Aplicación de fuentes de luz sobre modelos fotogramétricos para el diagnóstico y restauración virtual de objetos en cera policromada.
- Talaya, J., Bosch, E., Alamús, R., Serra, A., y Baron, A. (2004). GEOVAN: The mobile mapping system from the ICC. *In Proceedings of the 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT'2004)*, 12-22.
- Talwar, S., Kaur, P., Nunkoo, R., y Dhir, A. (2022). Digitalization and sustainability: virtual reality tourism in a post pandemic world. *Journal of Sustainable Tourism*, 1-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09669582.2022.2029870>
- Tao, C. V. (2000). Mobile mapping technology for road network data acquisition. 2(2), 1-14.
- Tao, C. V., Chapman, M., y Chaplin, B. (2001). Automated processing of mobile mapping image sequences. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 5-6, 330-346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(01\)00026-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-2716(01)00026-0)
- Tao, X., Yujin, S., Xiaodi, Z., Jun, W., y Ting, L. (2021). Research on 3D modeling method for evaluation of urban underground space resources: A case study in Shanghai. *Earth Science Frontiers*, 28(4), 373.
- Tokmakidis, P., Spatalas, S., Tokmakidis, K., y Tsioukas, V. (8-11 de Sept. de 2014). Laser scanning in the service of the visually impaired. *GEOMAPPLICA Conference*. Skiathos island, Greece.
- Trumbull, L. (1908). *A manual of underground surveying*. Hill Publishing Company.
- Tulloch, M., Hu, W., y Chapman, M. (2006). Mapping underground infrastructure using photogrammetric methods. *In Masters Abstracts International*, 47(4).

- Ullman, S. (1979). *The interpretation of structure from motion*. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, vol. 203, no. 1153, pp. 405-426.
- Unesco (1992). Memory of the World.
- Unión Europea, D. O. (2011). Recomendación de la comisión de 27 de octubre de 2011 sobre la digitalización y accesibilidad en línea del material cultural y la conservación digital.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:283:0039:0045:ES:PDF>
- Unión Europea, D. O. (2021). Recomendación de la comisión de 10 de noviembre de 2021 relativa a un espacio común europeo de datos para el patrimonio cultural.
<https://www.boe.es/doue/2021/401/L00005-00016.pdf>
- Valle Melón, J. (2007). Documentación geométrica del patrimonio: propuesta conceptual y metodológica. *Doctoral dissertation, Universidad de la Rioja*.
- Verma, S., Warriar, L., Bolia, B., y Mehta, S. (2022). Past, present, and future of virtual tourism-a literature review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(2), 100085. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100085>
- Vicente Martín, P. (2021). Documentación gráfica del Patrimonio Arquitectónico de la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción en Monleón, Salamanca. *Trabajo de Fin de Máster. Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca*. Ávila, España.
- Zhang, S., Li, Y., Ruan, W., y Liu, C. (2022). Would you enjoy virtual travel? The characteristics and causes of virtual tourists' sentiment under the influence of the COVID-19 pandemic. *Tourism management*, 88, 104429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tourman.2021.104429>
- Zlot, R., & Bosse, M. (2014). Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave & Karst Studies*, 76(3).
- Zouaghi, F. (2019). Obtención de la cartografía de detalle y productos derivados en zonas urbanas. *Trabajo de Fin de Máster. Universidad Pública de Navarra*. Navarra, España. <https://academica-e.unavarra.es/server/api/core/bitstreams/bdf55241-66d7-45c1-ae49-ec3ca5dc76ac/content>
- 3D Stoa - Patrimonio y Tecnología*, S. L. (2024). Accedido el 10 de julio de 2024 de <https://3dstoa.com/>

12. ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ventana Azul de Malta. Fuente: Elaboración propia (2015). | 1 |
| Figura 2. Derrumbe ventana Azul de Malta. Fuente: Guía de Malta (2017). | 1 |
| Figura 3. Ventana Azul de Malta Artificial. Fuente: Andreev, S. (2018). | 1 |
| Figura 4. Gouffre de Padirac. Fuente: Elaboración propia..... | 2 |
| Figura 5. Gouffre de Padirac. Fuente: Elaboración propia..... | 2 |
| Figura 6. <i>Gouffre de Padirac, planta y sección.</i> Fuente: Elaboración propia. | 2 |
| Figura 7. <i>Esquema de la justificación del Trabajo de Fin de Máster.</i> Fuente: Elaboración propia. | 6 |
| Figura 8. Vista desde la ventana en Le Gras. Fuente: Aragon, S. (2023). | 9 |
| Figura 9. <i>Matriz y patrón de búsqueda.</i> Fuente: Sánchez Sobrino, J. A. (2006)..... | 11 |
| Figura 10. <i>Toma fotográfica ideal (imagen paralela al sistema terreno). Condición de colinealidad.</i> Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001). | 11 |
| Figura 11. Condición de coplanaridad. Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001). | 12 |
| Figura 12. 'Stereo pairs of images'. Fuente: Kasser, M. y Egels, Y. (2002)..... | 13 |
| Figura 13. Ejemplo de diferentes configuraciones de 'bundle solution'. Fuente: Kasser, M. y Egels, Y. (2002). | 13 |
| Figura 14. Posición de las cámaras paralelas. Fuente: Linder, W. (2006)..... | 14 |
| Figura 15. Posición de las cámaras convergentes. Fuente: Linder, W. (2006)..... | 14 |
| Figura 16. <i>Recomendaciones toma exterior planar.</i> Fuente: Agisoft (2024)..... | 14 |
| Figura 17. Recomendaciones toma interior. Fuente: Agisoft (2024)..... | 14 |
| Figura 18. Toma estereoscópica. Fuente: Pérez Arias, B. (2018). | 14 |
| Figura 19. Toma oblicua. Fuente: Pérez Arias, B. (2018)..... | 15 |
| Figura 20. Geometría en un modelo estéreo orientado. Fuente: Linder, W. (2006)..... | 15 |
| Figura 21. Proyección central y proyección paralela (estereográfica). Fuente: Linder, W. (2006). | 16 |
| Figura 22. Nube de puntos desde vista de cámara. Fuente: Elaboración propia..... | 17 |
| Figura 23. Mapa de profundidad desde vista de cámara. Fuente: Elaboración propia. | 17 |
| Figura 24. GoPro Survey Rig. Fuente: Jordan, J. H. (2017). | 20 |
| Figura 25. Ejemplo de aplicación del método fotogramétrico para medir deformaciones relativas en secciones de túneles (izquierda). Vista en 3D que muestra las poses de la cámara y las posiciones de los objetivos en 3D (puntos rojos) junto con los rayos proyectados (derecha). Fuente: Scaioni, M. et al. (2014)..... | 21 |
| Figura 26. Vista en planta de la configuración típica para un estudio de fotogrametría estereoscópica en la mina Lucky Friday. Fuente: Benton, D. J. et al. (2017). | 21 |
| Figura 27. Estudio fotogramétrico realizado en la rampa 54 de la mina Lucky Friday. Fuente: Benton, D. J. et al. (2017)..... | 22 |
| Figura 28. UAVs inspección de interiores. Elios 2, izquierda. Elios 3: sistema de estabilización, derecha. Fuente: Flyability (2021) y Flyability (2022)..... | 23 |
| Figura 29. Toma de datos fotogramétricos con foco de apoyo manual. Fuente: García Bustos et al., (2023). | 23 |
| Figura 30. Esquema de la metodología aplicada. Fuente: García Bustos et al., (2023). | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 31. Arquitectura del museo virtual construido. Fuente: García Bustos et al., (2023). | 24 |
| Figura 32. Especificaciones del equipo. Fuente. Karkazi, E. et al. (2024). | 25 |
| Figura 33. Escáner láser 3D terrestre con iluminación LED integrada. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024). | 25 |
| Figura 34. Aplicación de la técnica de rebote. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024). | 25 |
| Figura 35. Toma de datos aérea. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024). | 26 |
| Figura 36. Nube de puntos, vista interior. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024). | 26 |
| Figura 37. Nube de puntos, vista exterior. Fuente: Karkazi, E. et al. (2024). | 26 |
| Figura 38. Cámara con flash auxiliar. Fuente: Begleiter, S. H. (2014). | 29 |
| Figura 39. Disposición ideal de fotogramas en vuelo. Fuente: Pérez Álvarez, J. A. (2001). | 30 |
| Figura 40. The VISAT system (Video Inertial Satellite). Fuente: El-Sheimy, N. (1996). | 30 |
| Figura 41. Área de recubrimiento en función de la distancia focal. Fuente: Elaboración propia. | 32 |
| Figura 42. Cobertura del terreno en función de la altura de vuelo. Fuente: Elaboración propia. | 32 |
| Figura 43. Cobertura estereoscópica en función de la altura de vuelo y la distancia focal. Fuente: Elaboración propia. | 32 |
| Figura 44. Sistema de cuerda simple. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 33 |
| Figura 45. Sistema de cuerda doble. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 33 |
| Figura 46. Telescopio superior, elevación. Fuente: Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 47. Telescopio lateral, proyección isométrica. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 48. Nivel de estrella. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 49. Tipos de plomada. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 50. Telescopio. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 51. Telescopio solar. Fuente: Trumbull, L. W. (1908). | 34 |
| Figura 52. Comunicación por rampa. Fuente: García Martín, A. (2011). | 35 |
| Figura 53. Comunicación por pozo y rampa. Fuente: García Martín, A. (2011). | 35 |
| Figura 54. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por métodos ópticos desde exterior (izquierda) y desde el interior (derecha). Fuente: García Martín, A. (2011). | 36 |
| Figura 55. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por el método de anteojos cenit-nadir. Fuente: García Martín, A. (2011). | 36 |
| Figura 56. Ejemplo de aplicación de transmisión de la orientación por método directo (izquierda) y por trigonometría (derecha). Fuente: García Martín, A. (2011). | 36 |
| Figura 57. Configuración simple de un sistema primario Backpack MMS. Fuente: Ellum, C. M., & El-Sheimy, N. (2001). | 37 |
| Figura 58. Especificaciones Ultracam Panther (1). Fuente: GTBibérica (2020). | 38 |
| Figura 59. Especificaciones Ultracam Panther (2). Fuente: GTBibérica (2020). | 38 |
| Figura 60. BMM Mosaic Xplor. Fuente: Mosaic (2023). | 40 |
| Figura 61. SLAM ZEB Horizon. Fuente: FARO (2024). | 40 |
| Figura 62. Vista general del sistema GNSS / INS / LiDAR – SLAM. Fuente: Chang, L. et al., (2019). | 41 |
| Figura 63. Cinemática en tiempo real (RTK). Fuente: Department of Geography (2023). | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 64. Cinemática de postproceso (PPK). Fuente: Hammer Missions (2023)..... | 42 |
| Figura 65. Carta de color sobre “Cabeza de Gárgola” (Catedral de Sigüenza). Fuente: 3D Stoa..... | 44 |
| Figura 66. Revelado de imágenes en Adobe Camera Raw de un “Campanillo” de bronce (Catedral de Sigüenza). Fuente: 3D Stoa..... | 44 |
| Figura 67. Método de investigación aplicado al sitio arqueológico de S.Nicolò. Banfi, F. (2020). | 45 |
| Figura 68. Esquema flujo metodológico. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 46 |
| Figura 69. Generación de modelos paramétricos. Fuente: Banfi, F. (2020). | 47 |
| Figura 70. Flujo de trabajo digital y herramientas del proyecto de realidad virtual implementado. Fuente: Banfi, F. (2020). | 47 |
| Figura 71. Posicionamiento toma fotográfica exterior, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 48 |
| Figura 72. Previsualización de máscaras manuales, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 48 |
| Figura 73. Previsualización de mapas de profundidad, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 48 |
| Figura 74. Nube de puntos, iglesia Nª Sª de la Asunción, Monleón (Salamanca). Fuente: Vicente Martín, P. (2021). Enlace a Sketchfab: https://skfb.ly/ooozx | 49 |
| Figura 75. Sección transversal, Recap. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 49 |
| Figura 76. Sección longitudinal, Recap. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 50 |
| Figura 77. Zonas parciales de la nube de puntos interior, Cloudcompare. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 50 |
| Figura 78. Paso previo a eliminar los puntos correspondientes al mobiliario, Cloudcompare. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 50 |
| Figura 79. Detalle del mallado de alambre, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 51 |
| Figura 80. Malla compacta monocroma, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 51 |
| Figura 81. Malla con color de vértices, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). | 51 |
| Figura 82. Textura, formato JPG. Fuente: Vicente Martín, P. (2021)..... | 51 |
| Figura 83. Modelo final texturizado, Metashape. Fuente: Vicente Martín, P. (2021). ... | 51 |
| Figura 84. Proceso de retopología. Curso Optimización y postproceso de modelos 3D fotogramétricos, Koré Formación (2022). Fuente: Elaboración propia. | 52 |
| Figura 85. El proyecto VR de las antiguas ruinas del sitio arqueológico de Bajardo. El usuario puede interactuar con objetos animados de realidad virtual y descubrir los valores históricos y culturales de uno de los patrimonios construidos más importantes del oeste de Liguria. Fuente: Banfi, F. (2020). | 53 |
| Figura 86. Proceso de toma de datos 3D láser exterior (izquierda) e interior (derecha). | 57 |
| Figura 87. Nube de puntos dispersa de la bodega, exterior e interior. | 57 |
| Figura 88. Malla de una de las partes de la Galería 1. | 58 |
| Figura 89. Fase de texturizado del modelo 3D en las Galerías 6 y 7. | 58 |
| Figura 90. Situación de la bodega sobre imagen satelital actual del Instituto Geográfico Nacional..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 91. Ortoimagen del alzado de la fachada de la bodega..... | 59 |
| Figura 92. Sección generada sobre el alzado norte de la Galería 4. | 59 |
| Figura 93. Sección longitudinal, alzado principal y alzado lateral, levantamiento. Fuente: Sandoval, J. (1991). | 60 |
| Figura 94. Planta, levantamiento. Fuente: Sandoval, J. (1991). | 60 |
| Figura 95. <i>Puerta reutilizada como elemento de contención para evitar el derrumbe de la galería.</i> | 62 |
| Figura 96. Inspección visual desde el pozo de acceso. | 63 |
| Figura 97. Trabajos con riesgo de derrumbe. | 63 |
| Figura 98. Ubicación del pozo de acceso (verde) y disposición de las galerías. | 64 |
| Figura 99. Acceso en pozo y sección de la galería principal con medidas. | 64 |
| Figura 100. Vista general y denominación de las galerías. | 64 |
| Figura 101. Orientación de las galerías. | 65 |
| Figura 102. Estado de conservación de las estructuras (Galería 2). | 65 |
| Figura 103. Marcas de pico en el techo de la Galería 2. | 66 |
| Figura 104. Vista del sistema de entibado en la Galería 2 (desde el punto de acceso). | 66 |
| Figura 105. Derrumbes y posibles continuaciones de galerías..... | 67 |
| Figura 106. Detalle de poste con restos de cuerdas claveteados (Galería 2)..... | 67 |
| Figura 107. Detalle de unión de postes de entibado de las galerías. | 68 |
| Figura 108. Vista de la Galería 1 desde acceso. | 68 |
| Figura 109. Bombín y cableado en la Galería 1..... | 69 |
| Figura 110. Ortoimagen en sección de la Galería 1, señalando desnivel en techo, escalón y pavimento..... | 69 |
| Figura 111. Pequeño parche de pavimento de ladrillos. | 70 |
| Figura 112. Ortoimagen de detalle del alzado Este de la Galería 2, con elementos de carpintería reutilizados como método de contención de las arcillas expansivas. | 70 |
| Figura 113. Vista Oeste de la Galería 3..... | 71 |
| Figura 114. Vista Este de la Galería 3 con fragmento de puerta reutilizada. | 71 |
| Figura 115. Galería 3 anegada con escala. | 71 |
| Figura 116. Captura de datos en el interior de las galerías. | 73 |
| Figura 117. Trabajo de campo, inspección visual. | 73 |
| Figura 118. Croquis manual realizado por Mónica Major. | 73 |
| Figura 119. Planimetría bodega. Fuente: Áqaba Arqueólogos. | 73 |
| Figura 120. Toma de datos con iluminación artificial. | 74 |
| Figura 121. Planta Galería 1..... | 74 |
| Figura 122. Planta Galería 2..... | 75 |
| Figura 123. Planta Galería 3-4..... | 75 |
| Figura 124. Secciones de Galería 3 con ortoimagen en CAD y anotaciones. | 75 |
| Figura 125. Secciones de Galería 1 en CAD y anotaciones. | 75 |
| Figura 126. Vista aérea, pozo en Corral de Almaguer..... | 77 |
| Figura 127. Trabajos previos, limpieza y acondicionamiento..... | 77 |
| Figura 128. <i>Polea de descenso/ascenso (izquierda) y estructura de trabajo (derecha).</i> | 78 |
| Figura 129. Limpieza de raíces y algas de las paredes del pozo. | 78 |
| Figura 130. Uso de pértiga para mantener la estabilidad en la toma de datos. | 79 |


| | |
|--|-----|
| Figura 131. Nube de puntos. | 79 |
| Figura 132. Malla y situación del pozo..... | 79 |
| Figura 133. Ortoimagen cenital, esquema en planta. | 80 |
| Figura 134. Sección con escala gráfica. | 80 |
| Figura 135. ‘Render’ en sección. | 80 |
| Figura 136. Tríptico de trabajo de campo. | 81 |
| Figura 137. Infografía resumen de los trabajos realizados. | 81 |
| Figura 138. Estado anterior del interior de la noria. | 83 |
| Figura 139. Infografía resumen de los trabajos realizados. | 84 |
| Figura 140. Captura de datos en el interior de las galerías. | 86 |
| Figura 141. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del pavimento de la bodega..... | 87 |
| Figura 142. Ejemplos de secciones de la bodega en CAD..... | 87 |
| Figura 143. Ortoimagen de las cubiertas de las galerías..... | 88 |
| Figura 144. Reproceso Bodegas del Arrabal. Fuente: Elaboración propia. | 90 |
| Figura 145. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia. | 91 |
| Figura 146. Toma de datos aérea. Fuente: Elaboración propia..... | 91 |
| Figura 147. Inclinación del modelo. Fuente: Elaboración propia. | 92 |
| Figura 148. Inclinación del modelo, detalle de tendeles y llagas. Fuente: Elaboración propia. | 92 |
| Figura 149. Toma de datos aérea, planta. Fuente: Elaboración propia..... | 93 |
| Figura 150. Posición de cámaras aéreas, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia. | 93 |
| Figura 151. Textura 2 x 8 K en modelo HP. Fuente: Elaboración propia..... | 93 |
| Figura 152. Reproceso Bodegas de Vicálvaro. Fuente: Elaboración propia..... | 94 |
| Figura 153. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia. | 95 |
| Figura 154. GCP, galerías 1 y 2. Fuente: Elaboración propia..... | 95 |
| Figura 155. GCP, galerías 3 y 4. Fuente: Elaboración propia..... | 95 |
| Figura 156. GCP, galería 5. Fuente: Elaboración propia. | 96 |
| Figura 157. Posición de GCP, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia. | 96 |
| Figura 158. Textura 2 x 8 K en modelo HP. Fuente: Elaboración propia..... | 97 |
| Figura 159. Reproceso Pozo Viejo de Corral de Almaguer. Fuente: Elaboración propia. | 97 |
| Figura 160. Detalle de imágenes borrosas y desenfocadas. | 98 |
| Figura 161. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia. | 98 |
| Figura 162. Posición de cámaras, estimaciones de error. Fuente: Elaboración propia..... | 99 |
| Figura 163. Medida de distancia y GCP. Fuente: Elaboración propia. | 99 |
| Figura 164. Textura 2 x 8 K en modelo HP. Fuente: Elaboración propia..... | 100 |
| Figura 165. Imagen RAW sin editar. Fuente: Elaboración propia. | 100 |
| Figura 166. Solución de MMS diseñada por Pix4D. Fuente: Blog Pix4D (2024). | 105 |
| Figura 167. Reconstrucción de la Bodega 5 perteneciente a Bodega de Vicálvaro, Madrid (s. XVIII). Fuente: Sketchfab de 3D Stoa Patrimonio y Tecnología S.L. (2021)..... | 106 |

13. ÍNDICE DE TABLAS


| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Gradings for a cave line survey. Fuente: BCRA (2002)..... | 19 |
| Tabla 2. Gradings for recording cave passage detail. Fuente: BCRA (2002)..... | 19 |
| Tabla 3. Formatos de imagen en fotogrametría. Fuente: Elaboración propia. | 45 |
| Tabla 4. Gráfica de tiempos del proyecto. Fuente: Elaboración propia. | 55 |
| Tabla 5. Ficha Bodegas del Arrabal. Fuente: Elaboración propia. | 56 |
| Tabla 6. Ficha Túnel, Vallecas. Fuente: Elaboración propia. | 61 |
| Tabla 7. Ficha Bodegas, Vicálvaro. Fuente: Elaboración propia..... | 72 |
| Tabla 8. Ficha Pozo Viejo, Corral de Almaguer. Fuente: Elaboración propia. | 76 |
| Tabla 9. Ficha Noria del Vivero, Bailén. Fuente: Elaboración propia. | 82 |
| Tabla 10. Ficha Bodega, Brunete. Fuente: Elaboración propia..... | 85 |
| Tabla 11. Parámetros elegidos en el reproceso de los casos de estudio. Fuente: Elaboración propia..... | 101 |
| Tabla 12. Relación entre número de imágenes, puntos de paso y polígonos de la malla original. Fuente: Elaboración propia. | 102 |

'HARDWARE'


Cámara réflex DSLR Pentax K-50. Especificaciones.

| Especificaciones. CÁMARA RÉFLEX DSLR PENTAX K-50 | |
|--|---|
| Cámara |  |
| Tipo | Cámara fotográfica DSLR de exposición automática |
| Memoria | Tarjeta de memoria SD, compatible con tarjetas WiFi y SDXC |
| Dimensiones | 128.5 mm (ancho) x 96.5 mm (alto) x 71.5 mm (profundidad) |
| Peso | Aprox. 650 g (con batería y tarjeta de memoria) 590 g (Puro Cuerpo) |
| Sensor | CMOS con filtro de color primario de 16.28 megapíxeles efectivos |
| Procesador de imagen | PRIME M |
| Estabilización | Sistema de estabilización del sensor con función Shake Reduction (Estabilizador óptico) |
| Visor | Pentaprisma con aproximadamente 100% del campo de visión |
| Pantalla | Pantalla angular LCD de 3 pulgadas con 921.000 píxeles |
| Conectividad | USB 2.0 (tipo mini B) / Salida AV, USB MSC/PTP, compatible con Windows XP (SP3) o superior y Mac OS X 10.5 o superior |
| Enfoque | SAFOX IXi+ de 11 puntos seleccionables (9 puntos de enfoque tipo cruz en el centro) |
| ISO | 100-51200 |
| Velocidad de obturación máxima | 1/6000 a 30s |
| Flash | Replegable P-TTL incorporado |
| WiFi | No |
| Sellado | 81 juntas selladas, a prueba de salpicaduras de agua, polvo y temperaturas de hasta -10° C |
| Autonomía | 480 disparos aproximadamente |

Aeronave DJI Phantom 4 Pro. Especificaciones.

| CÁMARA INTEGRADA CON SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN | |
|--|---|
| <p>Plataforma aérea multirrotor de 4 motores en el mismo plano con controladora de vuelo integrada, electrónica integrada, sistema de control mediante RC a 2,4 GHz y 5,8 GHz.</p> <p>Controladora de vuelo: Integrada. GPS y magnetómetros: Integrado. IMU con S/N: Integrado. Sistema de radio DJI: Integrado.</p> <p>Chasis DJI Phantom 4 Pro. Controladora de vuelo Integrada en la aeronave. GPS-Brújula integrados. IMU. 4 motores DJI. 4 hélices modelo DJI o compatible sistema de radio y transmisión y recepción de imágenes. Soporte de carga de pago: giro-estabilizado de 3 ejes Marca DJI integrado.</p> |  |
| Sensor | CMOS de 1"; píxeles efectivos: 20 M |
| Objetivo | FOV (campo de visión) 84°, 8,8 mm (equivalente a formato de 35 mm: 24 mm), f/2.8 - f/11, enfoque automático a 1 m - ∞ |
| Intervalo de iso | Vídeo: 100 - 3200 (Auto); 100 - 6400 (Manual) Foto: 100 - 3200 (Auto); 100 - 12800 (Manual) |
| Obturador mecánico | 8 - 1/2000 s |
| Obturador electrónico | 8 - 1/8000 s |
| Tamaño de imagen | Relación de aspecto 3:2: 5472x3648 Relación de aspecto 4:3: 4864x3648 Relación de aspecto 16:9: 5472x3078 |
| Modos de fotografía | Un disparo Disparo en ráfagas: 3/5/7/10/14 fotogramas Horquilla de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas en horquilla de exposición a 0.7EV Bias Intervalo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s |
| Tasa de bits de video máx. | 100 Mbps |
| Sistemas de archivo | FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB) |
| Fotografía | JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG |
| Vídeo | MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265) |
| Tarjetas SD admitidas | MicroSD, Capacidad máxima: 128 GB. Velocidad de escritura ≥15 MB/s; se necesita clasificación clase 10 o UHS-1 |
| Temperatura | de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F) |


Cámara Canon EOS M100. Especificaciones.

| CÁMARA CANON EOS M100 | | | |
|---|---|----------------------|--|
| SENSOR DE IMAGEN | | | |
| Tipo | CMOS de 22,3 x 14,9 mm | | |
| Píxeles efectivos | Aprox. 24,2 megapíxeles | | |
| Píxeles totales | Aprox. 25,8 megapíxeles | | |
| Relación de aspecto | 3:2 | | |
| Filtro de paso bajo | Incorporado/fijo | | |
| Limpieza de sensor | Sistema integrado de limpieza EOS | | |
| Tipo de filtro de color | Colores primarios | | |
|  | | | |
| | | CÁMARA | |
| | | PROCESADOR DE IMAGEN | |
| | | Tipo | DIGIC 7 |
| | | OBJETIVO | |
| | | Montura del objetivo | EF-M (los objetivos EF y EF-S son compatibles mediante el adaptador de montura EF-EOS M) |
| | | Distancia focal | Equivalente a 1,6 x la longitud focal del objetivo |
| Estabilizador de la Imagen | Estabilizador Óptico de la Imagen en objetivos compatibles IS digital de tres ejes con Movie: Enhanced en objetivos compatibles | | |
| ENFOQUE | | | |
| Tipo | Sistema AF Dual Pixel CMOS. Píxeles de detección de fase incorporados en el sensor de imagen. | | |
| Sistema AF/Puntos AF | Máximo de 49 puntos AF (ubicaciones fijas en retícula de 7x7) mediante selección automática de la cámara. Posición de 1 punto AF o 1 zona AF (9 puntos, retícula de 3x3) mediante selección manual. | | |
| Rango de funcionamiento AF | -1 - 18 EV (a 23 °C, ISO 100 con EF-M 22mm f/2 STM) | | |
| Modos AF | AF Foto a Foto y Servo AF | | |
| Selección del punto AF | Cara + Seguimiento: seguimiento de la cara y los sujetos mediante reconocimiento automático o selección manual a través de la pantalla táctil. Selección automática de hasta 49 puntos AF cuando no se reconoce ninguna cara dentro del encuadre. Zona AF suave: selección de zona manual y selección automática de hasta 9 puntos AF en la zona seleccionada. AF en 1 punto: selección manual mediante la pantalla táctil o los botones. | | |
| Visualización de puntos AF seleccionados | Indicado en el monitor LCD | | |
| Bloqueo AF | Bloqueado cuando se presiona el disparador hasta la mitad o botón de bloqueo AE personalizable. | | |

| | |
|---|---|
| Haz de ayuda AF | Mediante haz de ayuda LED |
| Enfoque manual | Con objetivos EF-S y EF: selección mediante el interruptor AF/MF del objetivo. Con objetivos EF-M: selección mediante botón MF específico u otros botones personalizables (cambio AF/MF). MF Peaking disponible. AF+MF disponible (Ajuste manual del enfoque tras AF foto a foto). Aumento de la imagen disponible durante MF (5x o 10x). |
| CONTROL DE EXPOSICIÓN | |
| Modos de medición | Medición en tiempo real desde el sensor de la imagen (1) Medición evaluativa (384 zonas) (2) Medición parcial en el centro (aprox. el 10 % de la pantalla de Visión en Directo) (3) Medición promediada con preponderancia central (4) Medición puntual (aprox. el 2 % de la pantalla de Visión en Directo) |
| Rango de medición | Imagen fija: EV 1 - 20 (a 23 °C, ISO 100) Vídeo: EV 2 - 20 (a 23 °C, ISO 100) |
| Bloqueo AE | Automático: funciona en el modo AF Foto a foto con exposición de medición evaluativa bloqueada cuando se consigue el enfoque Manual: mediante el botón de bloqueo AE en los modos de la zona creativa |
| Compensación de la exposición | +/- 3 EV en incrementos de 1/3 de punto |
| Sensibilidad ISO | ISO automática (100 - 25600), 100-25600 en incrementos de 1/3 de punto Vídeo: ISO automática (100 - 6400), 100 - 12800 en incrementos de 1/3 de punto |
| OBTURADOR | |
| Tipo | Obturador electrónico de plano focal |
| Velocidad | 30 - 1/4000 s (en incrementos de 1/3 de paso), Bulb (rango de velocidad de obturación total. La gama disponible varía dependiendo del modo de disparo) |
| BALANCE DE BLANCOS | |
| Tipo | Balance de blancos automático con el sensor de imagen |
| Ajustes | Balance de blancos automático (AWB), luz día, sombra, nublado, tungsteno, luz Fluorescente, flash, personalizado, temperatura del color (en incrementos de 100 kelvin) Compensación de balance de blancos: 1. Azul/ámbar +/-9 niveles 2. Magenta/verde +/-9 niveles |
| Balance de blancos personal | Sí, se puede registrar 1 configuración |
| FLASH | |
| Número guía de flash incorporado (100 ISO, metros) | 5 |
| Cobertura del flash incorporado | Cobertura máxima a aproximadamente 15 mm (equivalente en 35 mm: aprox. 24 mm) |
| Tiempo de reciclaje del flash incorporado | Aprox. 5 segundos |


| | |
|--|--|
| Modo de disparo | Automático (E-TTL II) |
| Compensación de la Exposición con Flash | +/- 2 EV en incrementos de 1/3 |
| TIPO DE ARCHIVO | |
| Tipo de imágenes | JPEG: buena, normal (compatible con Exif 2.30) / Regla de diseño para Camera File system (2.0) RAW: RAW (14 bits, Canon RAW original, 2ª edición), DPOF (Formato de orden de impresión digital) compatible con la versión 1.1 |
| Grabación simultánea de RAW+JPEG | Sí, RAW + varios niveles de compresión JPEG posibles |
| Tamaño de imagen | RAW: (3:2) 6000 x 4000, (4:3) 5328 x 4000, (16:9) 6000 x 3368, (1:1) 4000 x 4000 JPEG 3:2: (G) 6000 x 4000, (M) 3984 x 2656, (P1) 2976 x 1984, (P2) 2400 x 1600 JPEG 4:3: (G) 5328 x 4000, (M) 3552 x 2664, (P1) 2656 x 1992, (P2) 2112 x 1600 JPEG 16:9: (G) 6000 x 3368, (M) 3984 x 2240, (P1) 2976 x 1680, (P2) 2400 x 1344 JPEG 1:1: (G) 4000 x 4000, (M) 2656 x 2656, (P1) 1984 x 1984, (P2) 1600 x 1600 Procesador RAW en la cámara y ajuste de tamaño de Imagen disponible en reproducción |

Receptor RTK GNSS, Emlid Reach RS2. Especificaciones.

| RECEPTOR RTK GNSS, EMLID REACH RS2 | | |
|------------------------------------|--|---|
| MECÁNICAS | | |
| Dimensiones | 126 x 126 x 142 mm |  |
| Peso | 950 g | |
| Temperatura | -20...+65 °C | |
| Grado de protección | IP67 agua y polvo | |
| GNSS | | |
| Señales de satélites | GPS/QZSS L1C/A, L2C, GLONASS, L1OF, L2OF, BeiDou B1I, B2I, Galileo E1-B/C, E5b | |
| Número de canales | 184 | |
| Velocidad de procesamiento | 20Hz GPS / 5Hz GNSS | |
| CONECTIVIDAD | | |
| Radio LoRa UHF | Rango de frecuencia | 868 / 915 MHz |
| | Potencia | 0,1 W |
| | Rango | Hasta 8 km |
| Modem 3,5 G | Regiones | Global |
| | Bandas | Quad-band, 850/1900,900/1800 MHz |
| | Tarjeta SIM | Nano-SIM |
| Wi-Fi | 802,11 b/g/n | |
| Bluetooth | 4,0 / 2,1 EDR | |
| Puertos | RS-231, USB-C | |
| ELÉCTRICAS | | |
| Autonomía | 16h como rover RTK 3,5G; 22h logeando | |
| Batería | LiFePO4 6400 mAh, 6,4 V | |
| Rango de voltaje de alimentación | 6 - 40 V | |
| Carga | USB-C 5 V 2 A | |
| DATOS | | |
| Formatos de salida de posiciones | NMEA, LLH/XYZ | |
| Correcciones | NTRIP, VRS, RTCM3 | |
| Registro de datos | RINEX con tasa de refresco hasta 20 Hz | |

| | | |
|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Almacenamiento interno | 16 GB | |
| POSICIONAMIENTO | | |
| Precisión | Estático | H: 4 mm + 0,5 ppm V: 8 mm + 1 ppm |
| | PPK | H: 5 mm + 0,5 ppm V: 10 mm + 1 ppm |
| | RTK | H: 7 mm + 1 ppm V: 14 mm + 1 ppm |
| Tiempo de convergencia | ≈ 5 s típico | |
| IMU | 9DOF | |

FARO Laser Scanner Focus 3D X330. Especificaciones.

| FARO Laser Scanner Focus 3D X330. | | |
|-----------------------------------|---|---|
| GENERAL | | |
| Alimentación | 19 V (alimentación externa), 14,4 V (batería interna) | |
| Consumo de potencia | 440 W y 80 W respectivamente (durante la carga de la batería) | |
| Duración de la batería | Hasta 4,5 horas |  |
| Temperatura ambiente | 5° - 40° C | |
| Humedad | Sin condensación | |
| Cable de conexión | Ubicado en la montura del escáner | |
| Peso | 5,2 kg | |
| Dimensiones | 240 x 200 x 100 mm | |
| Mantenimiento/calibración | Anual | |
| PRECISIÓN | | |
| Unidad telemétrica | Intervalo de ambigüedad | De 122 a 488 Kpts/s:614 m a 976 Kpts/s: 307 |
| | Rango Focus ^{3D} X 330 | 0,6 m – 330 m en interiores o al aire libre e incidencia normal en superficies reflectantes de un 90% |
| | Velocidad de medición | 122,000 / 244,000 / 488,000/ 976,000 (puntos/seg) |
| | Error de rango | ± 2 mm |
| Unidad de color | Resolución | Hasta 70 megapíxeles en color |
| | Función de color dinámico | Adaptación automática del brillo |
| | Paralaje | Co-axial |
| Unidad reflectora | Campo de visión (vert./hori.) | 300° / 360° |
| | Resolución (vert./hori.) | 0,009° (40,960 3D pixel en 360°) / 0,009° (40,960 3D pixel en 360°) |
| | Velocida máx. de escaneo vert. | 5,820 rpm o 97 Hz |
| Láser (emisor óptico) | Clase Láser | Clase 1 |
| | Longitud de onda | 1550 nm |
| | Divergencia del haz | Typical 0,19 mrad (0,011°) (1/e, medio ángulo) |
| | Diámetro del haz (al salir) | Typical 2,25 mm (1/e) |

| | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---|
| Gestión de datos y control | Almacenamiento de datos | SD, SDHC™, SDXC™; tarjeta de 32GB incluida en la entrega |
| | Control del escáner | Mediante pantalla táctil y WLAN |
| | Nuevo acceso WLAN | Es posible controlar el escáner a distancia, visualizar y descargar los escaneos con dispositivos portátiles con Flash |
| Multi-Sensor | Compensador de eje dual | Nivela cada escaneo; exactitud 0,015°; rango de medición $\pm 5^\circ$ |
| | Sensor de altura | Con ayuda de un altímetro electrónico, se puede averiguar la altura en relación con una referencia y asignar al escaneo |
| | Brújula electrónica | La brújula electrónica confiere a los escaneos una orientación en relación con los puntos cardinales. Dispone de una función de calibración |
| | GPS | GPS integrado |

‘SOFTWARE’

Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape es un ‘software’ de procesamiento de imágenes digitales que combina técnicas de fotogrametría digital y visión computacional, para generar una reconstrucción 3D. Utilizado como parte fundamental para el levantamiento fotogramétrico.



RealityCapture

Reality Capture es un ‘software’ de fotogrametría que permite generar modelos 3D a partir de un conjunto de imágenes y escaneos láser. Utilizado en campos como el patrimonio cultural, cartografía, videojuegos, efectos visuales y realidad virtual y aumentada, entre otros.



AutoCAD AutoDesk

AutoCAD es un ‘software’ de diseño, dibujo, modelado, dibujo arquitectónico e ingeniería en 2D y 3D; incluyendo el concepto de espacio papel y espacio modelo.



CloudCompare

CloudCompare es un ‘software’, diseñado por el ingeniero francés Daniel Girardeau-Montaut, de procesamiento de nube de puntos 3D. Muy utilizado en la digitalización del Patrimonio. A cada punto se le asocia el color del objeto y un valor de clasificación que define el tipo de elemento que representa (vegetación, suelo, edificaciones...). También puede manejar mallas triangulares e imágenes calibradas.



Blender

Blender es un *'software'* formado por un conjunto de herramientas de creación 3D gratuito y de código abierto incluyendo modelado, procesamiento, animación y sistemas de control, edición de video, efectos visuales, composición, texturizado y varios tipos de simulaciones dinámicas.



Sketchfab

Es una red social que sirve de repositorio de modelos 3D. Actúa como visualizador web 3D y sirve para compartir objetos tridimensionales, permitiendo el acercamiento del Patrimonio de modo innovador.



Anexo II. Bodegas del Arrabal - 2024

Reprocesado de datos en un único bloque. Georreferenciación basada en el sistema RTK del DJI Phantom 4 Pro.

18 August 2024



Datos del levantamiento

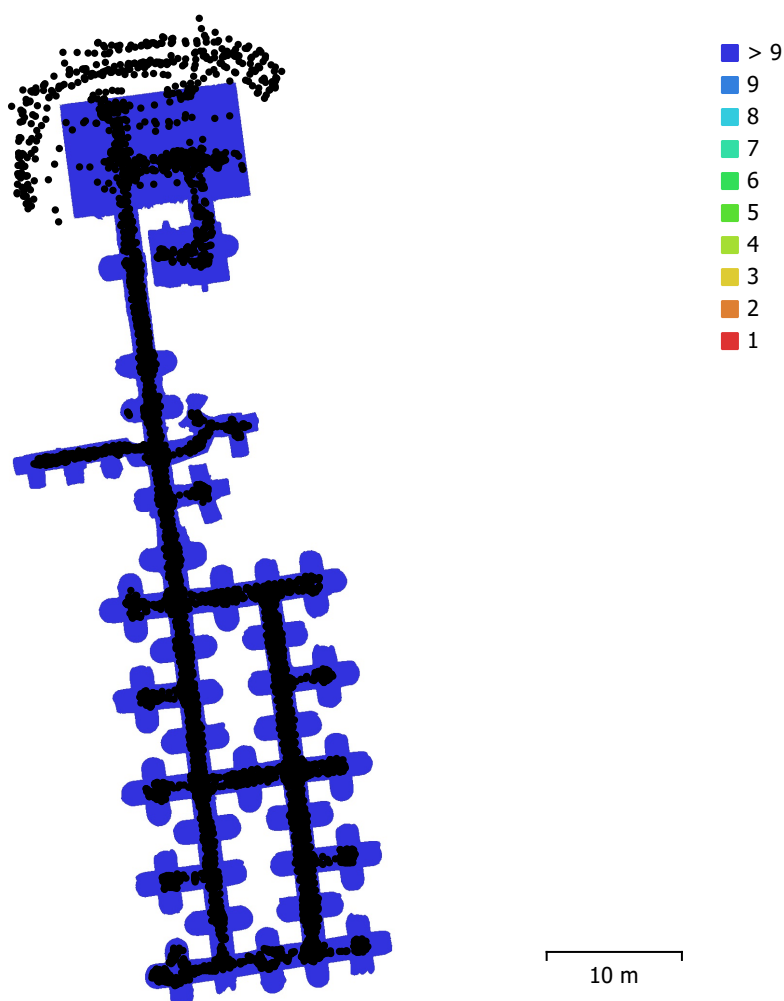


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 8,045

Altitud media de vuelo: 1.66 m

Resolución en terreno: 0.427 mm/pix

Área cubierta: 601 m²

Imágenes alineadas: 8,041

Puntos de paso: 10,118,211

Proyecciones: 28,961,508

Error de reproyección: 1.97 pix

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|------------------------|-------------|-----------------|--------------------|--------------|
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (21.25...) | 3264 x 4928 | 21.25 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (21.25...) | 4928 x 3264 | 21.25 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (20mm) | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| PENTAX K-50 (20mm) | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (23.13... | 4928 x 3264 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (23.13... | 3264 x 4928 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (24.38... | 4928 x 3264 | 24.38 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (24.38... | 3264 x 4928 | 24.38 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| FC2103 (4.5mm) | 4048 x 3032 | 4.5 mm | 1.6 x 1.6 micras | No |

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

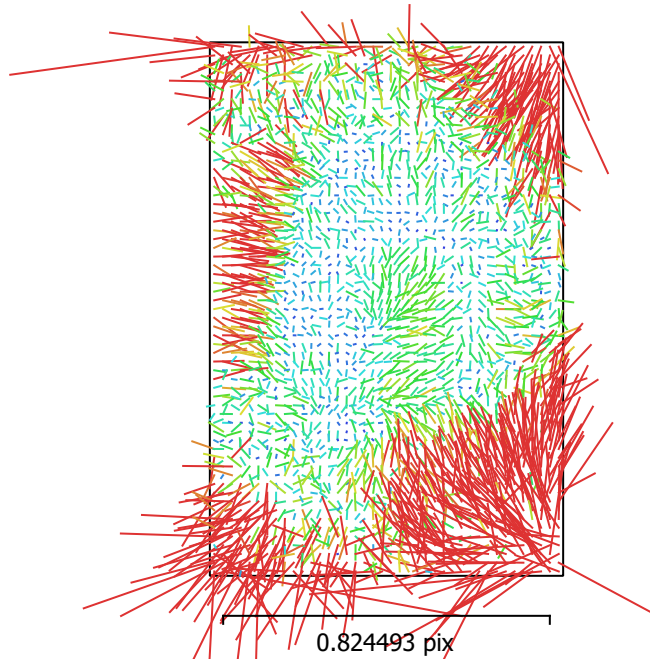


Fig. 2. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

3562 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3786.53 | 0.022 | 1.00 | -0.00 | 0.08 | -0.28 | 0.30 | -0.27 | 0.02 | 0.06 |
| Cx | -17.4992 | 0.035 | | 1.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.79 | 0.05 |
| Cy | 4.50121 | 0.053 | | | 1.00 | 0.01 | 0.00 | -0.00 | 0.04 | 0.93 |
| K1 | -0.0964386 | 3.3e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | 0.00 |
| K2 | 0.052991 | 0.00014 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | 0.01 |
| K3 | -0.0126869 | 0.00018 | | | | | | 1.00 | 0.00 | -0.01 |
| P1 | 0.000199956 | 1.9e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.04 |
| P2 | 0.000521201 | 2.9e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

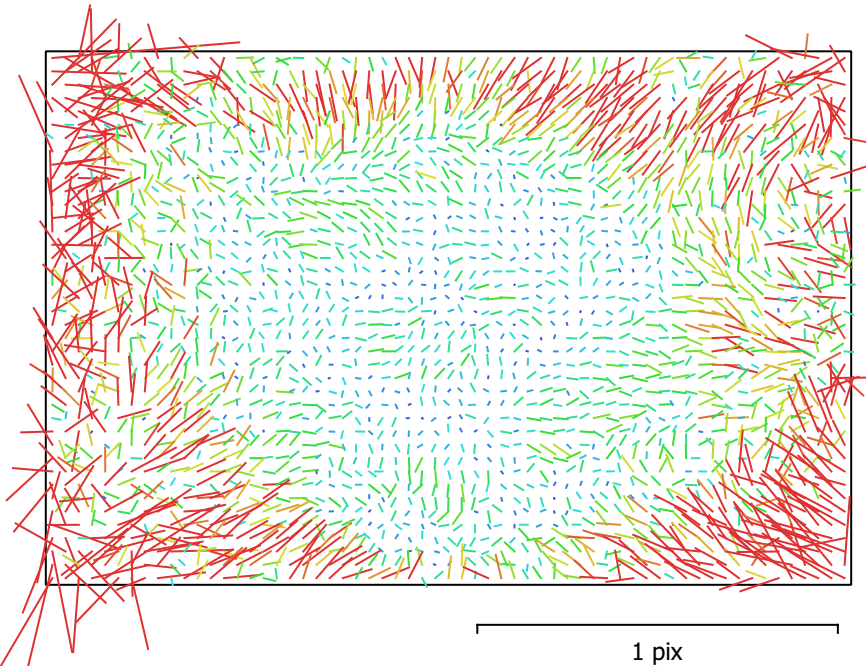


Fig. 3. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

3338 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3796.12 | 0.024 | 1.00 | -0.01 | 0.06 | -0.26 | 0.28 | -0.25 | -0.02 | 0.05 |
| Cx | 12.6903 | 0.044 | | 1.00 | 0.01 | -0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.91 | 0.00 |
| Cy | -2.12508 | 0.049 | | | 1.00 | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.89 |
| K1 | -0.0977061 | 3.5e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.89 | 0.00 | -0.00 |
| K2 | 0.0546419 | 0.00015 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | -0.00 |
| K3 | -0.015036 | 0.00019 | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.01 |
| P1 | -0.000216668 | 2.7e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.00 |
| P2 | 0.000358731 | 2.7e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 3. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

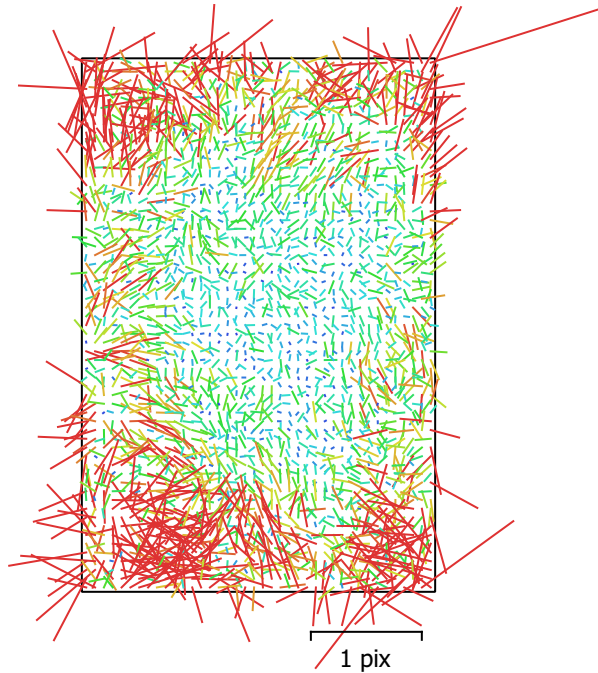


Fig. 4. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (21.25mm).

PENTAX K-50 (21.25mm)

126 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 21.25 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4378.05 | 0.11 | 1.00 | -0.08 | 0.04 | -0.32 | 0.32 | -0.30 | -0.01 | -0.00 |
| Cx | -21.9013 | 0.15 | | 1.00 | 0.02 | -0.01 | -0.00 | 0.01 | 0.71 | 0.04 |
| Cy | -14.2481 | 0.21 | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.94 |
| K1 | -0.0972391 | 0.00019 | | | | 1.00 | -0.97 | 0.90 | -0.01 | 0.00 |
| K2 | 0.0976011 | 0.0011 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | -0.00 |
| K3 | -0.0664034 | 0.0018 | | | | | | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| P1 | 0.000429138 | 8.3e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.04 |
| P2 | 0.000514228 | 1.2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 4. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

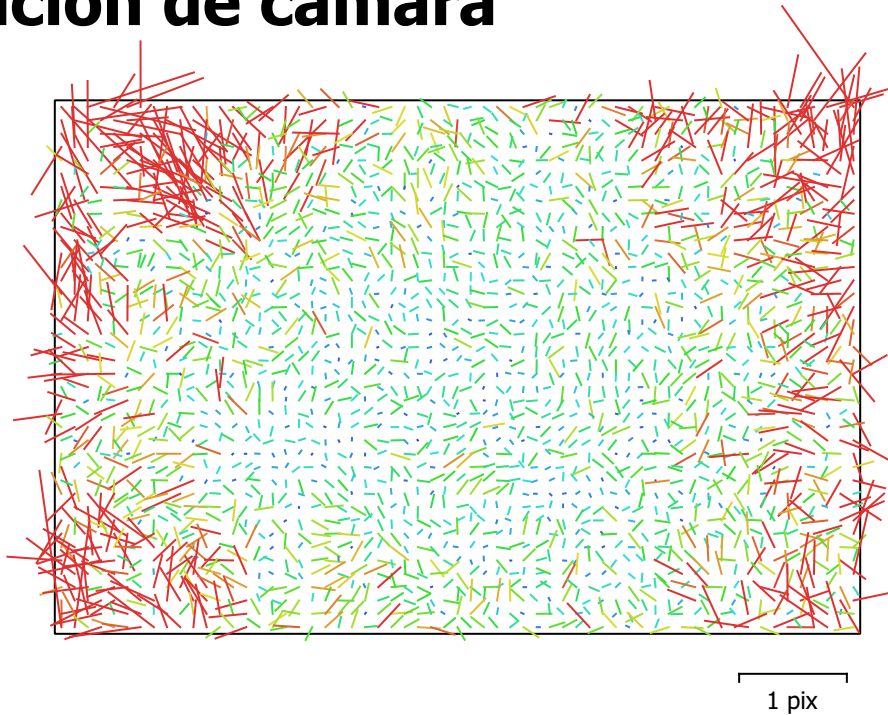


Fig. 5. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (21.25mm).

PENTAX K-50 (21.25mm)

120 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 21.25 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4374.59 | 0.12 | 1.00 | -0.04 | 0.03 | -0.29 | 0.31 | -0.28 | 0.00 | 0.03 |
| Cx | 22.1973 | 0.23 | | 1.00 | -0.00 | -0.01 | 0.00 | -0.00 | 0.92 | 0.00 |
| Cy | -9.64554 | 0.19 | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.85 |
| K1 | -0.100974 | 0.00021 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.89 | 0.00 | -0.01 |
| K2 | 0.106327 | 0.0012 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | 0.01 |
| K3 | -0.0728131 | 0.0019 | | | | | | 1.00 | -0.00 | -0.00 |
| P1 | 0.000262006 | 1.4e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.00 |
| P2 | 0.000198848 | 1.1e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 5. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

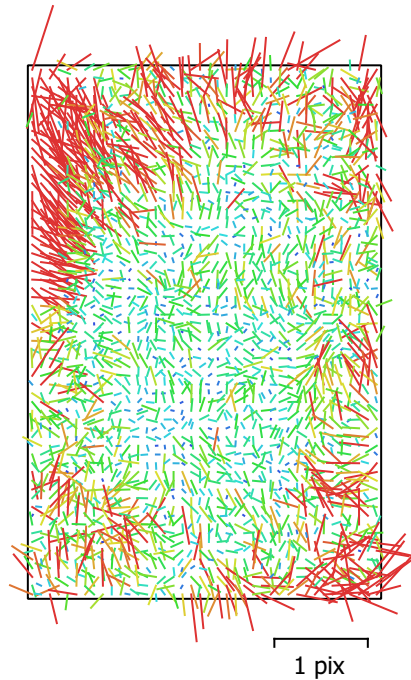


Fig. 6. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (20mm).

PENTAX K-50 (20mm)

82 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4182.76 | 0.12 | 1.00 | -0.01 | -0.09 | -0.32 | 0.31 | -0.27 | 0.04 | -0.02 |
| Cx | -21.2061 | 0.19 | | 1.00 | -0.10 | 0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.78 | -0.10 |
| Cy | -2.34557 | 0.21 | | | 1.00 | -0.02 | 0.01 | -0.01 | -0.09 | 0.90 |
| K1 | -0.0921266 | 0.00016 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | -0.00 | -0.03 |
| K2 | 0.0490165 | 0.00076 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | 0.02 |
| K3 | 0.00296926 | 0.0011 | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.01 |
| P1 | 0.000680277 | 1e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.10 |
| P2 | 0.000298609 | 1.2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 6. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

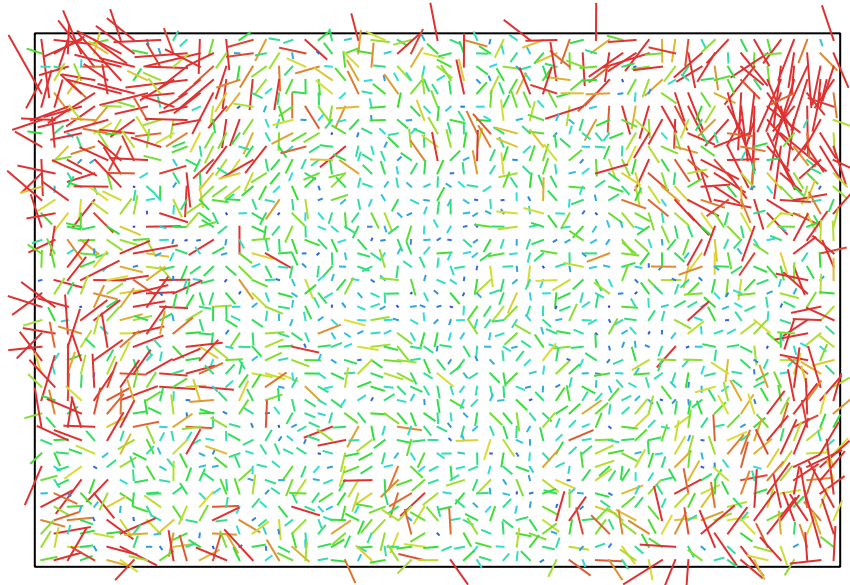


Fig. 7. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (20mm).

PENTAX K-50 (20mm)

116 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4186.98 | 0.094 | 1.00 | -0.04 | -0.11 | -0.31 | 0.27 | -0.23 | -0.07 | -0.01 |
| Cx | 29.3833 | 0.19 | | 1.00 | -0.05 | 0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.87 | -0.05 |
| Cy | 17.8161 | 0.15 | | | 1.00 | -0.02 | 0.01 | -0.00 | -0.05 | 0.76 |
| K1 | -0.0954248 | 0.00013 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.02 | -0.03 |
| K2 | 0.0787663 | 0.00064 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.02 | 0.01 |
| K3 | -0.0392722 | 0.0009 | | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 |
| P1 | 2.30184e-05 | 1e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.06 |
| P2 | 0.000612441 | 7.9e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 7. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

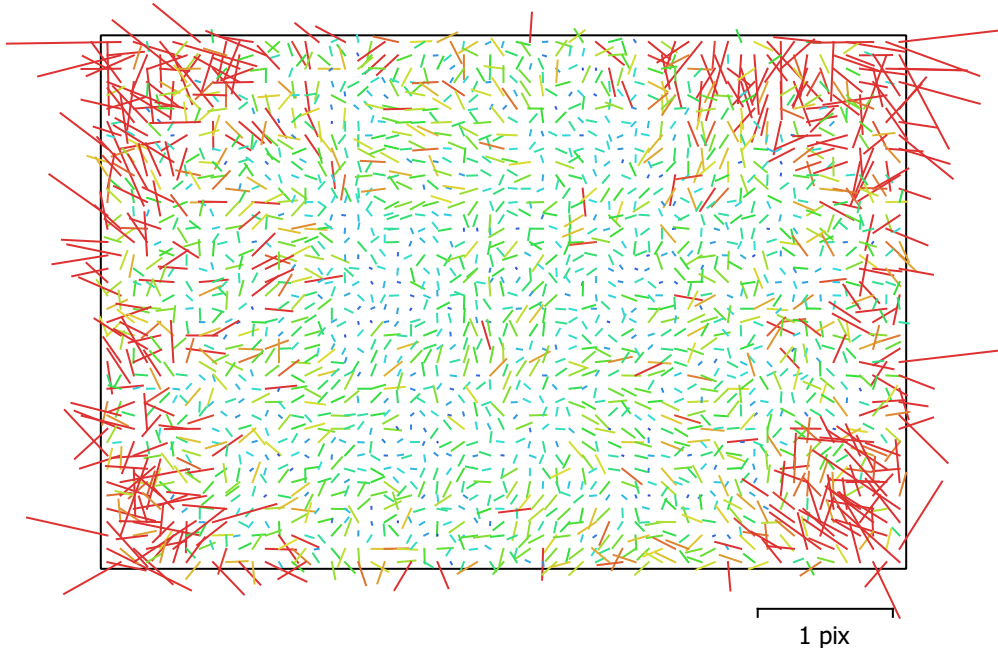


Fig. 8. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (23.13mm).

PENTAX K-50 (23.13mm)

151 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4614.96 | 0.15 | 1.00 | -0.02 | 0.09 | -0.20 | 0.23 | -0.21 | -0.01 | 0.09 |
| Cx | 23.4875 | 0.25 | | 1.00 | 0.00 | -0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.93 | 0.01 |
| Cy | -12.4206 | 0.24 | | | 1.00 | -0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.88 |
| K1 | -0.0856663 | 0.00022 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | -0.02 |
| K2 | 0.0756986 | 0.0014 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | 0.02 |
| K3 | -0.0443795 | 0.0025 | | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 |
| P1 | 3.52635e-05 | 1.4e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.01 |
| P2 | 0.00019473 | 1.2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 8. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

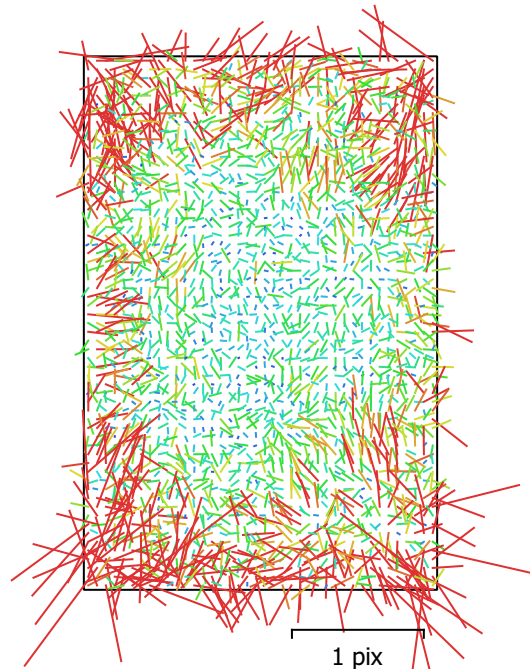


Fig. 9. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (23.13mm).

PENTAX K-50 (23.13mm)

157 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4605.56 | 0.14 | 1.00 | -0.02 | 0.04 | -0.24 | 0.25 | -0.23 | -0.02 | 0.04 |
| Cx | -14.7288 | 0.22 | | 1.00 | 0.07 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.84 | 0.06 |
| Cy | -7.59242 | 0.28 | | | 1.00 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.07 | 0.93 |
| K1 | -0.0849433 | 0.00021 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | -0.00 |
| K2 | 0.0770895 | 0.0013 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | 0.01 |
| K3 | -0.0494606 | 0.0025 | | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 |
| P1 | -0.00011723 | 1e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.06 |
| P2 | 0.000538186 | 1.4e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 9. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

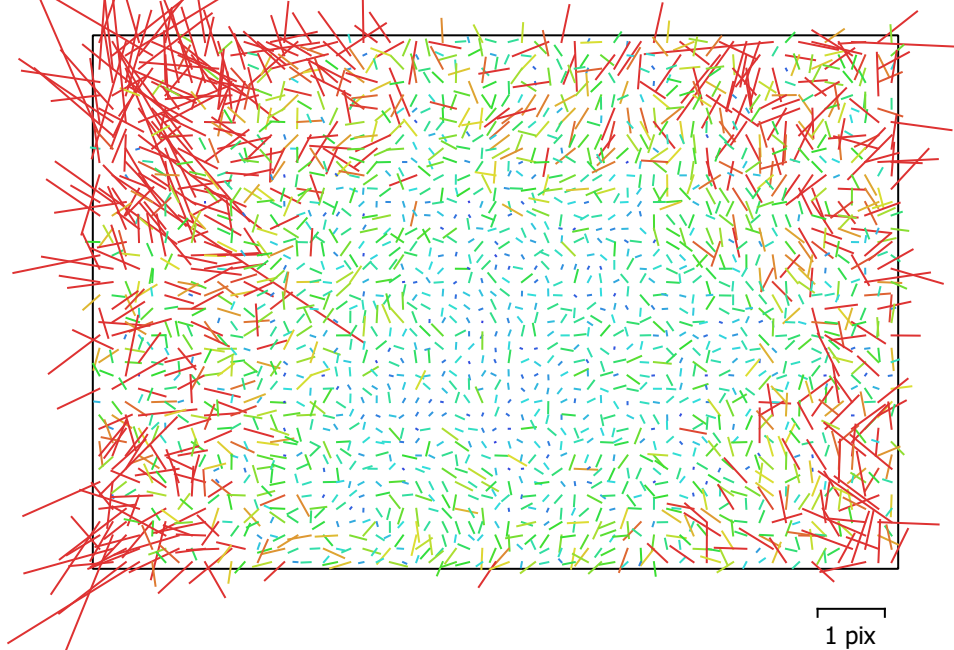


Fig. 10. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (24.38mm).

PENTAX K-50 (24.38mm)

29 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 24.38 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 5229.3 | 0.3 | 1.00 | -0.02 | -0.11 | -0.28 | 0.27 | -0.24 | -0.04 | -0.04 |
| Cx | 9.88514 | 0.59 | | 1.00 | -0.12 | 0.00 | -0.01 | 0.02 | 0.93 | -0.09 |
| Cy | -15.7445 | 0.5 | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.10 | 0.86 |
| K1 | -0.07806 | 0.00063 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | -0.02 |
| K2 | 0.104527 | 0.0053 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.02 | 0.00 |
| K3 | -0.0681166 | 0.013 | | | | | | 1.00 | 0.02 | 0.00 |
| P1 | -0.000192581 | 3.3e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.06 |
| P2 | 0.000417218 | 2.8e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 10. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

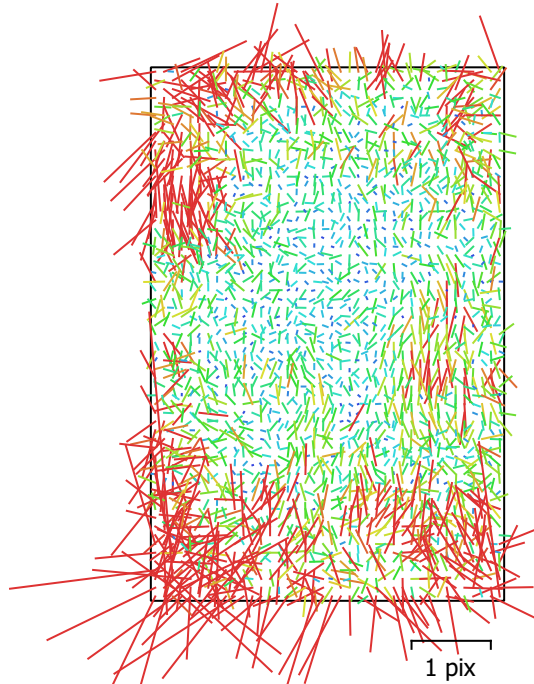


Fig. 11. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (24.38mm).

PENTAX K-50 (24.38mm)

55 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 24.38 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 5229.87 | 0.22 | 1.00 | -0.03 | 0.04 | -0.29 | 0.30 | -0.27 | 0.02 | 0.01 |
| Cx | -19.5535 | 0.31 | | 1.00 | 0.05 | -0.00 | -0.00 | 0.01 | 0.79 | 0.07 |
| Cy | -36.6353 | 0.41 | | | 1.00 | 0.03 | -0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.95 |
| K1 | -0.0766191 | 0.0004 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | -0.02 | 0.02 |
| K2 | 0.104221 | 0.0033 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.01 | -0.01 |
| K3 | -0.0579737 | 0.0079 | | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.00 |
| P1 | -0.000341416 | 1.6e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.08 |
| P2 | -0.000327923 | 2.2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 11. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

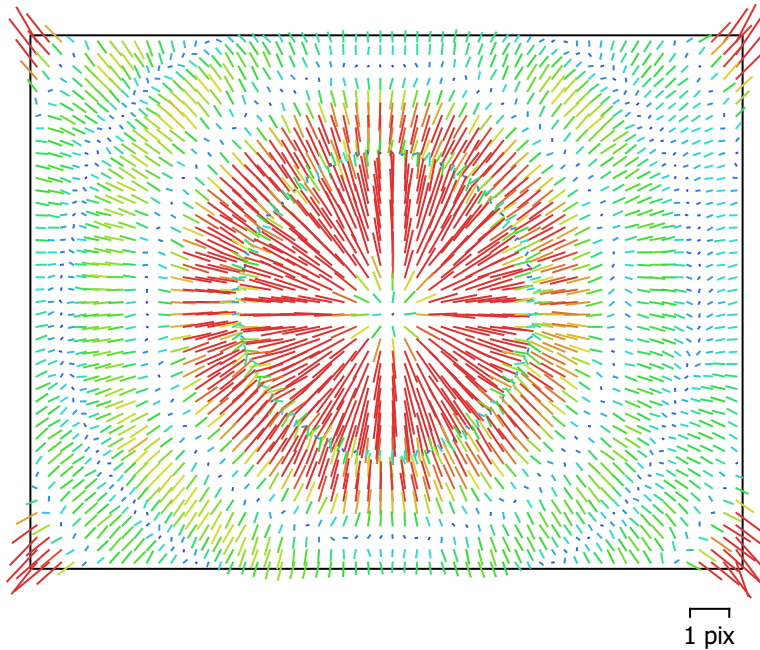


Fig. 12. Gráfico de residuales para FC2103 (4.5mm).

FC2103 (4.5mm)

309 imágenes

Tipo **Cuadro** Resolución **4048 x 3032** Distancia focal **4.5 mm** Tamaño de píxel **1.6 x 1.6 micras**

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3016.11 | 0.039 | 1.00 | -0.06 | -0.40 | -0.42 | 0.44 | -0.40 | -0.05 | -0.27 |
| Cx | -9.74328 | 0.05 | | 1.00 | 0.06 | -0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.92 | 0.03 |
| Cy | 15.3522 | 0.041 | | | 1.00 | -0.02 | -0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.79 |
| K1 | -0.0299575 | 6.4e-05 | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | 0.00 | -0.04 |
| K2 | 0.0867803 | 0.0002 | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.01 | -0.00 |
| K3 | -0.0668675 | 0.0002 | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.00 |
| P1 | -0.000974013 | 5.6e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.04 |
| P2 | -0.00154021 | 4.1e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 12. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

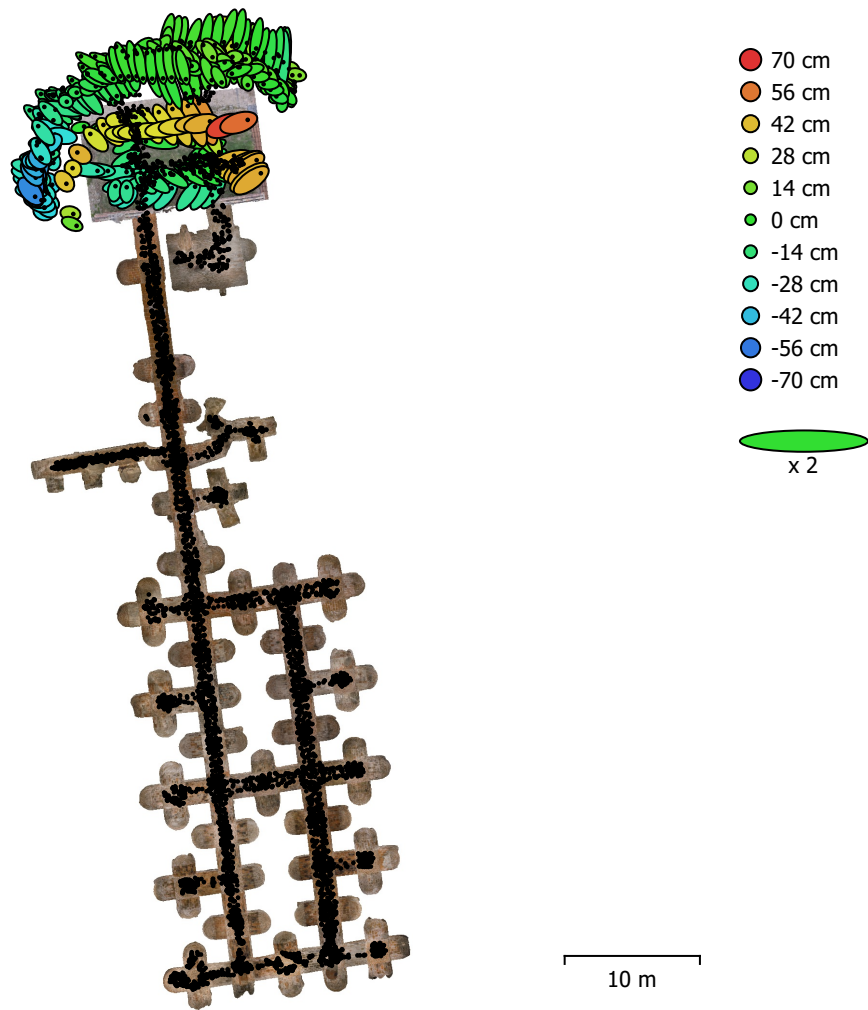


Fig. 13. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

| Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Error en XY (cm) | Error combinado (cm) |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 50.6015 | 55.3334 | 20.3981 | 74.982 | 77.707 |

Tabla 13. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

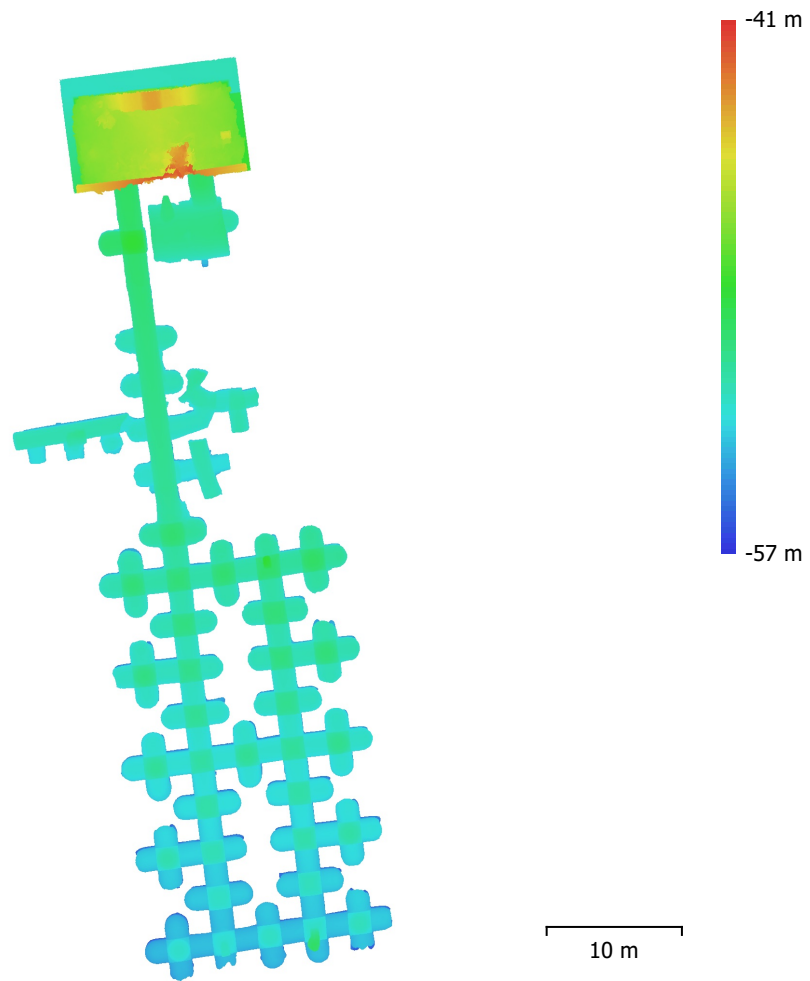


Fig. 14. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 6.12 cm/pix
Densidad de puntos: 267 puntos/m²

Parámetros de procesamiento

Generales

| | |
|------------------------|--|
| Cámaras | 8045 |
| Cámaras orientadas | 8041 |
| Sistema de coordenadas | ETRS89 / UTM zone 30N_Rednap_Alicante_Heigth |
| Ángulo de rotación | Guiñada, cabeceo, alabeo |

Puntos de paso

| | |
|---|--------------------------|
| Puntos | 10,118,211 de 12,061,840 |
| RMS error de reproyección | 0.423724 (1.97339 pix) |
| Error de reproyección máximo | 1.33058 (67.7466 pix) |
| Tamaño promedio de puntos característicos | 5.09607 pix |
| Colores de puntos | 3 bandas, uint8 |
| Puntos clave | No |
| Multiplicidad media de puntos de paso | 3.13385 |

Parámetros de orientación

| | |
|--|---------------------|
| Precisión | Máxima |
| Preselección genérica | Sí |
| Preselección de referencia | No |
| Puntos clave por foto | 80,000 |
| Límite de puntos clave por megapixel | 1,000 |
| Puntos de paso por foto | 8,000 |
| Excluir puntos de paso inmóviles | Sí |
| Emparejamiento guiado | No |
| Ajuste adaptativo del modelo de cámara | No |
| Tiempo búsqueda de emparejamientos | 18 horas 54 minutos |
| Uso de memoria durante el emparejamiento | 17.94 GB |
| Tiempo de orientación | 1 hora 49 minutos |
| Uso de memoria durante el alineamiento | 4.95 GB |
| Fecha de creación | 2023:12:31 14:31:47 |
| Versión del programa | 2.0.4.17434 |
| Tamaño de archivo | 843.93 MB |

Mapas de profundidad

| | |
|--------|------|
| Número | 8038 |
|--------|------|

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |
| Tiempo de procesamiento | 14 horas 23 minutos |
| Uso de memoria | 6.92 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:11 13:19:29 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 14.99 GB |

Modelo

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| Caras | 998,579 |
| Vértices | 500,223 |
| Colores de vértices | 3 bandas, uint8 |
| Textura | 4,096 x 4,096, 4 bandas, uint8 |

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

| | |
|-------------------------------|------|
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |

| | |
|--|---|
| Tiempo de procesamiento | 14 horas 23 minutos |
| Uso de memoria | 6.92 GB |
| Parámetros de reconstrucción | |
| Tipo de superficie | Arbitrario |
| Origen de datos | Mapas de profundidad |
| Interpolación | Habilitada |
| Máscaras volumétricas estrictas | No |
| Tiempo de procesamiento | 5 horas 10 minutos |
| Uso de memoria | 20.95 GB |
| Parámetros de texturizado | |
| Modo de mapeado | Genérico |
| Modo de mezcla | Mosaico |
| Tamaño de textura | 4,096 |
| Habilitar el cierre de agujeros | No |
| Habilitar el filtro de efecto fantasma | Sí |
| Tiempo de mapeado en UV | 1 minuto 35 segundos |
| uso de memoria para mapa UV | 771.35 MB |
| Tiempo de mezcla | 54 segundos |
| Uso de memoria durante la mezcla | 11.23 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:11 18:21:30 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 105.16 MB |
| Sistema | |
| Nombre del programa | Agisoft Metashape Professional |
| Versión del programa | 2.1.0 build 17214 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 31.70 GB |
| CPU | 12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900H |
| GPU(s) | Intel(R) Iris(R) Xe Graphics NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti Laptop GPU |

Anexo III. Bodegas de Vicálvaro - 2024

Reprocesado de cinco galerías en un único bloque. Georreferenciación basada en GCP obtenidos por receptor RTK.

18 August 2024



Datos del levantamiento

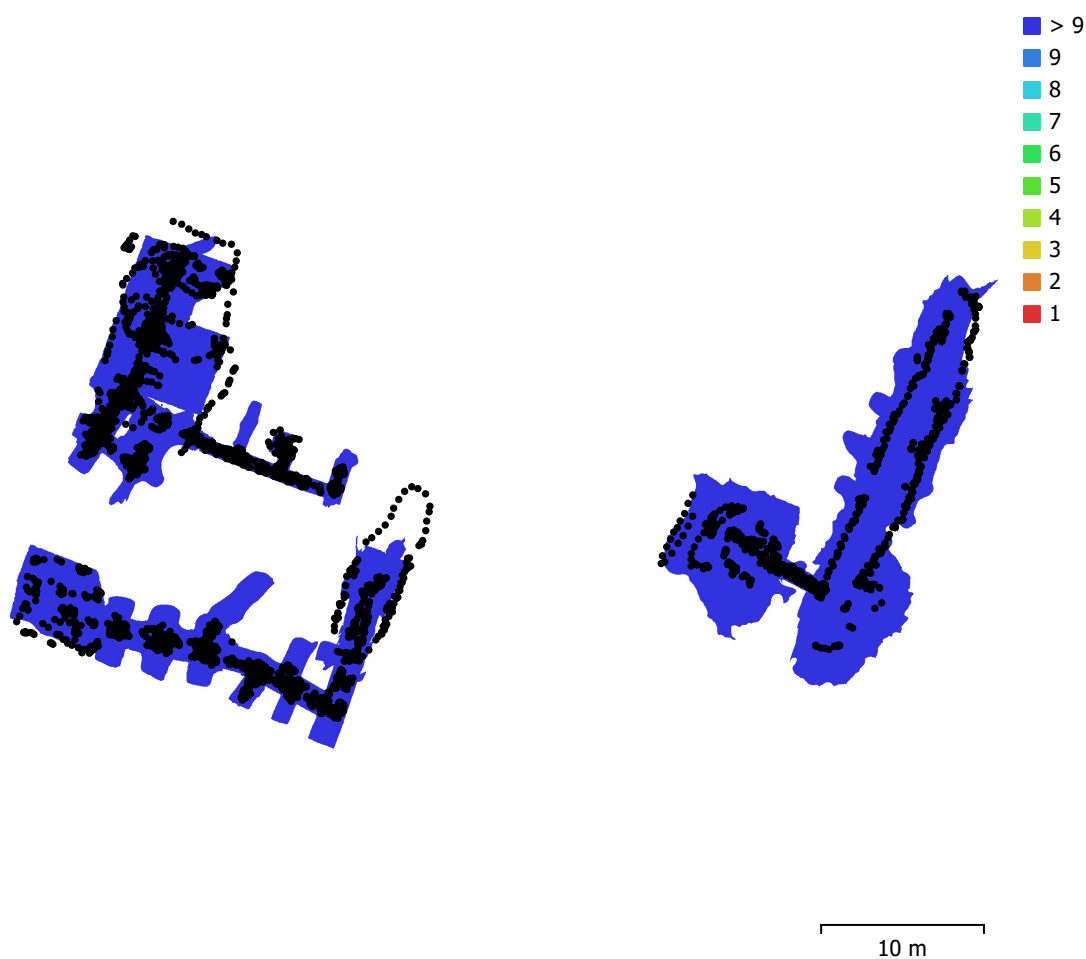


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 5,123

Altitud media de vuelo: 1.31 m

Resolución en terreno: 0.34 mm/pix

Área cubierta: 389 m²

Imágenes alineadas: 5,122

Puntos de paso: 35,324,289

Proyecciones: 99,072,651

Error de reproyección: 1.68 pix

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|------------------------|-------------|-----------------|--------------------|--------------|
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (42.5m...) | 4928 x 3264 | 42.5 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| PENTAX K-50 (20mm) | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (20mm) | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (20mm) | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (20mm) | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (18mm) | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (23.13... | 4928 x 3264 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |
| PENTAX K-50 (23.13... | 3264 x 4928 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras | No |

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

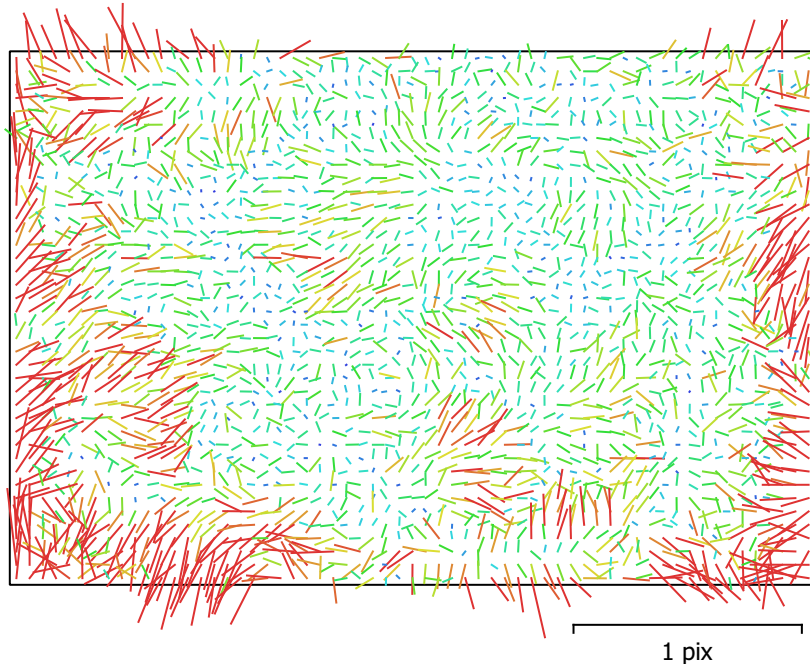


Fig. 2. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

339 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3816.62 | 0.084 | 1.00 | 0.02 | -0.33 | -0.00 | 0.14 | -0.13 | 0.02 | -0.18 |
| Cx | 3.50263 | 0.11 | | 1.00 | -0.07 | 0.02 | -0.01 | 0.01 | 0.94 | -0.07 |
| Cy | -8.19488 | 0.1 | | | 1.00 | -0.06 | 0.02 | -0.02 | -0.07 | 0.80 |
| K1 | -0.0995508 | 5.6e-05 | | | | 1.00 | -0.95 | 0.89 | 0.02 | -0.02 |
| K2 | 0.0604363 | 0.00021 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.02 | -0.01 |
| K3 | -0.0220349 | 0.00023 | | | | | | 1.00 | 0.02 | 0.00 |
| P1 | -0.000577351 | 6.9e-06 | | | | | | | 1.00 | -0.06 |
| P2 | 0.000555091 | 5.5e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

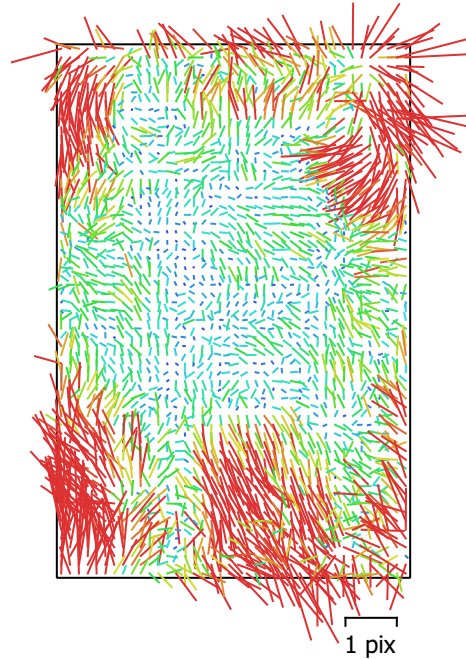


Fig. 3. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

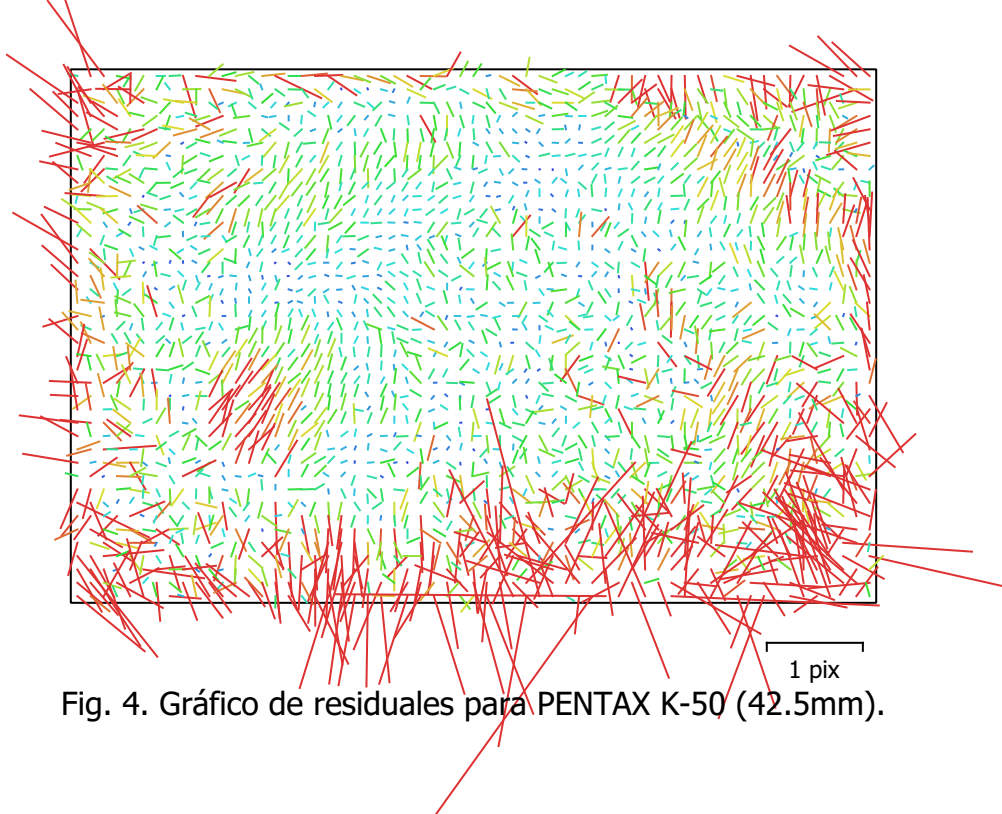
24 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3812.23 | 0.11 | 1.00 | -0.01 | -0.20 | -0.35 | 0.36 | -0.32 | 0.00 | -0.15 |
| Cx | -6.27379 | 0.18 | | 1.00 | 0.22 | -0.01 | -0.00 | 0.01 | 0.80 | 0.20 |
| Cy | -27.2508 | 0.22 | | | 1.00 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.20 | 0.91 |
| K1 | -0.0999013 | 0.00018 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | -0.00 | -0.00 |
| K2 | 0.0546571 | 0.00073 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | 0.01 |
| K3 | -0.0153068 | 0.00086 | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.02 |
| P1 | -0.000508702 | 1.3e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.16 |
| P2 | -0.00013222 | 1.5e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 3. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara



PENTAX K-50 (42.5mm)

6 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 42.5 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 9239.95 | 1.8 | 1.00 | -0.04 | -0.00 | -0.10 | 0.18 | -0.16 | -0.14 | -0.07 |
| Cx | 150.21 | 5.2 | | 1.00 | 0.01 | -0.02 | -0.02 | 0.02 | 0.95 | 0.05 |
| Cy | -33.9305 | 4.8 | | | 1.00 | -0.02 | 0.06 | -0.07 | 0.05 | 0.93 |
| K1 | 0.0460627 | 0.0045 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.89 | -0.04 | -0.00 |
| K2 | 0.348979 | 0.1 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.02 | 0.04 |
| K3 | -0.987457 | 0.71 | | | | | | 1.00 | 0.04 | -0.06 |
| P1 | 0.00281979 | 0.00025 | | | | | | | 1.00 | 0.08 |
| P2 | -0.00328888 | 0.00022 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 4. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

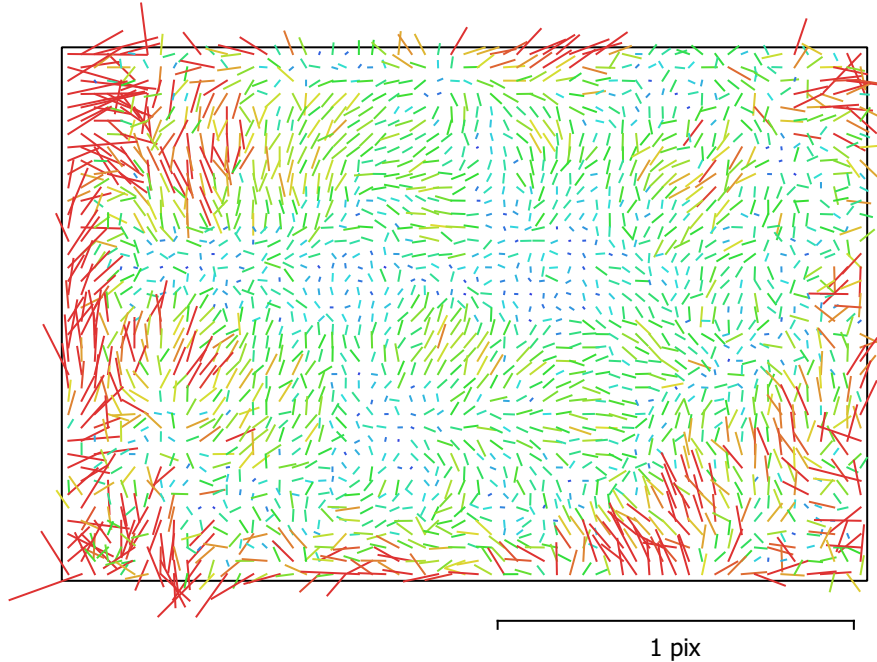


Fig. 5. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

1296 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3791.52 | 0.022 | 1.00 | 0.01 | 0.14 | -0.23 | 0.26 | -0.23 | -0.02 | 0.10 |
| Cx | 10.2563 | 0.049 | | 1.00 | 0.06 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.91 | 0.05 |
| Cy | -3.72369 | 0.065 | | | 1.00 | 0.02 | -0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.93 |
| K1 | -0.0973259 | 2.7e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.00 | 0.03 |
| K2 | 0.0557505 | 0.00011 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | -0.02 |
| K3 | -0.0142129 | 0.00013 | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.02 |
| P1 | 1.66322e-05 | 2.5e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.05 |
| P2 | 0.000324733 | 3e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 5. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

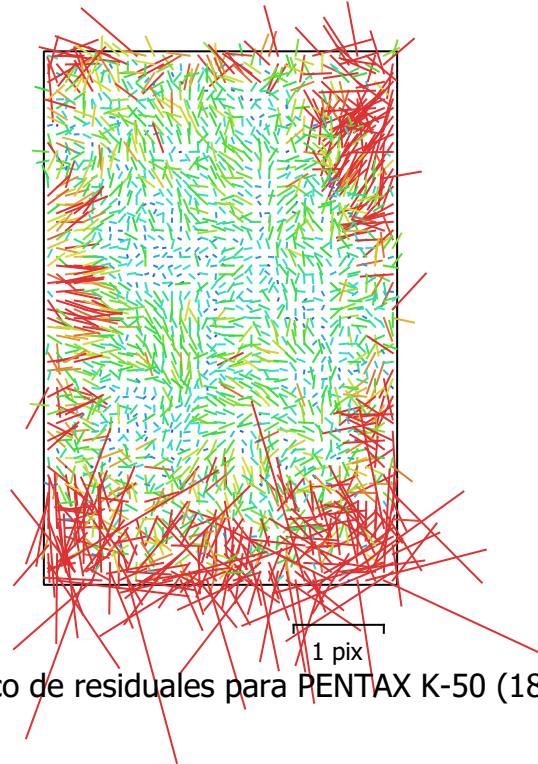


Fig. 6. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

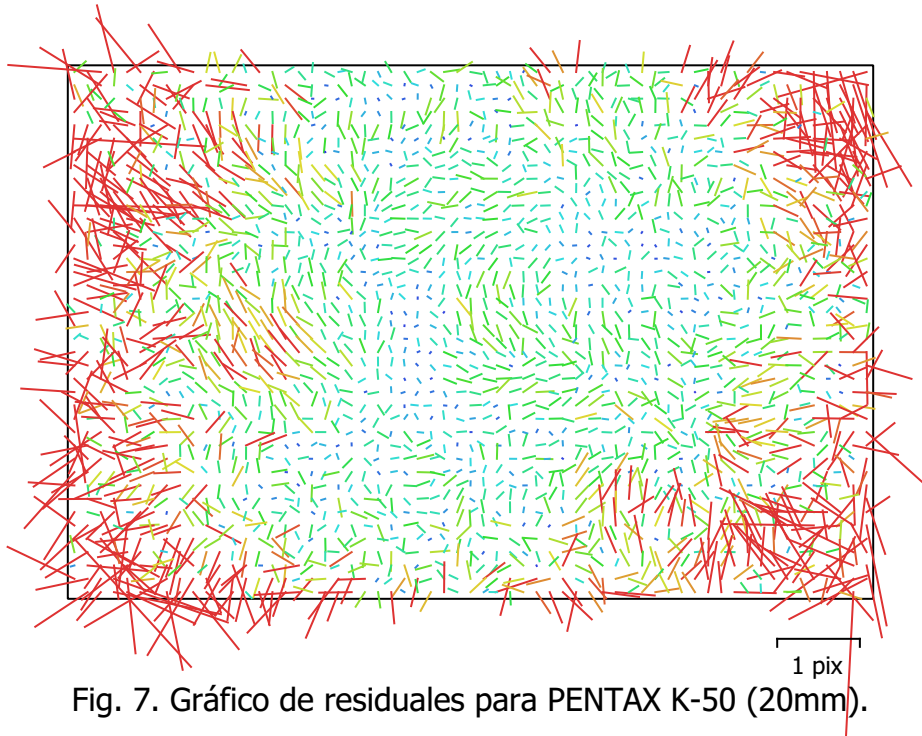
54 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3795.44 | 0.1 | 1.00 | -0.03 | 0.04 | -0.35 | 0.33 | -0.29 | 0.00 | 0.08 |
| Cx | -10.7472 | 0.14 | | 1.00 | 0.14 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.70 | 0.13 |
| Cy | -0.0589028 | 0.19 | | | 1.00 | -0.03 | 0.03 | -0.03 | 0.12 | 0.88 |
| K1 | -0.0899494 | 0.00018 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.02 | -0.04 |
| K2 | 0.028414 | 0.00078 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | 0.06 |
| K3 | 0.0100681 | 0.00098 | | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.05 |
| P1 | 0.000308396 | 8.4e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.11 |
| P2 | 0.000187517 | 1.2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 6. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara



PENTAX K-50 (20mm)

91 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4088.64 | 0.16 | 1.00 | 0.02 | 0.25 | -0.25 | 0.26 | -0.24 | 0.01 | -0.01 |
| Cx | 30.7027 | 0.29 | | 1.00 | -0.01 | 0.03 | -0.02 | 0.01 | 0.89 | -0.03 |
| Cy | -1.00523 | 0.26 | | | 1.00 | 0.01 | 0.01 | -0.01 | -0.02 | 0.82 |
| K1 | -0.0919336 | 0.00024 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.04 | 0.03 |
| K2 | 0.0549034 | 0.0012 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.02 | -0.01 |
| K3 | -0.0149907 | 0.0019 | | | | | | 1.00 | 0.02 | 0.01 |
| P1 | 0.000415447 | 1.6e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.03 |
| P2 | 0.000363548 | 1.4e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 7. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara



Fig. 8. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (20mm).

PENTAX K-50 (20mm)

5 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4080.28 | 0.58 | 1.00 | 0.02 | 0.12 | -0.55 | 0.52 | -0.46 | -0.02 | 0.07 |
| Cx | 36.0165 | 1.1 | | 1.00 | 0.31 | 0.09 | -0.06 | 0.04 | 0.76 | 0.32 |
| Cy | -9.18153 | 1.5 | | | 1.00 | 0.06 | -0.02 | 0.01 | 0.28 | 0.94 |
| K1 | -0.107552 | 0.0015 | | | | 1.00 | -0.97 | 0.91 | 0.17 | 0.06 |
| K2 | 0.123227 | 0.008 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.13 | -0.03 |
| K3 | -0.125904 | 0.012 | | | | | | 1.00 | 0.09 | 0.02 |
| P1 | 0.000341562 | 6.8e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.24 |
| P2 | 0.00227951 | 9.5e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 8. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

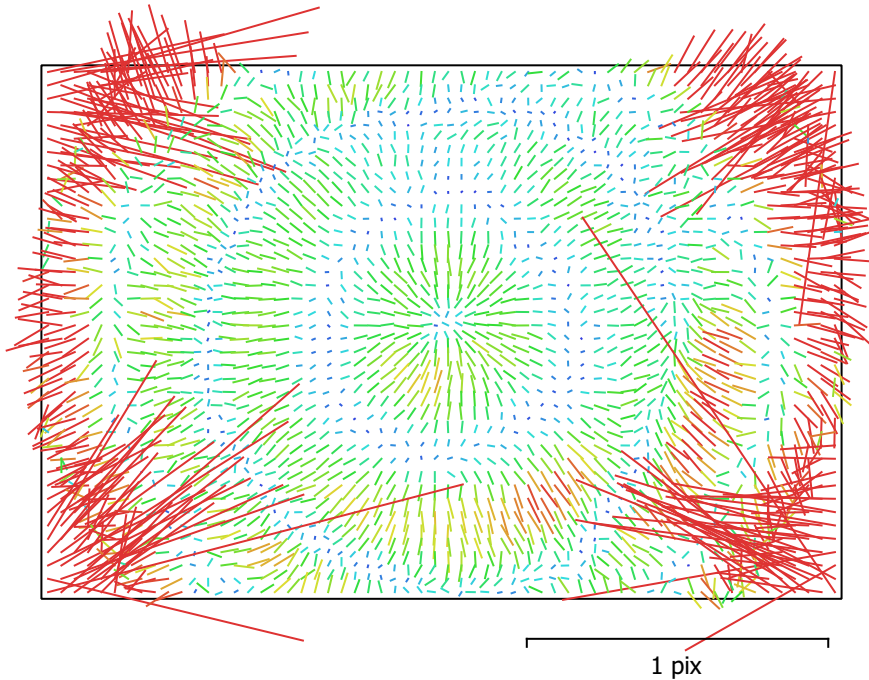


Fig. 9. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15mm).

Canon EOS M100 (15mm)

625 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4157.16 | 0.015 | 1.00 | -0.02 | -0.03 | -0.15 | 0.23 | -0.20 | -0.02 | 0.00 |
| Cx | 13.041 | 0.026 | | 1.00 | 0.01 | 0.02 | -0.01 | -0.00 | 0.90 | 0.01 |
| Cy | -8.35621 | 0.029 | | | 1.00 | -0.03 | 0.02 | -0.02 | 0.01 | 0.89 |
| K1 | -0.139622 | 1.2e-05 | | | | 1.00 | -0.95 | 0.89 | 0.01 | -0.02 |
| K2 | 0.129287 | 4.7e-05 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | 0.02 |
| K3 | -0.0479417 | 5.1e-05 | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.01 |
| P1 | 0.000460161 | 1.3e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.01 |
| P2 | 0.000349443 | 1.3e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 9. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

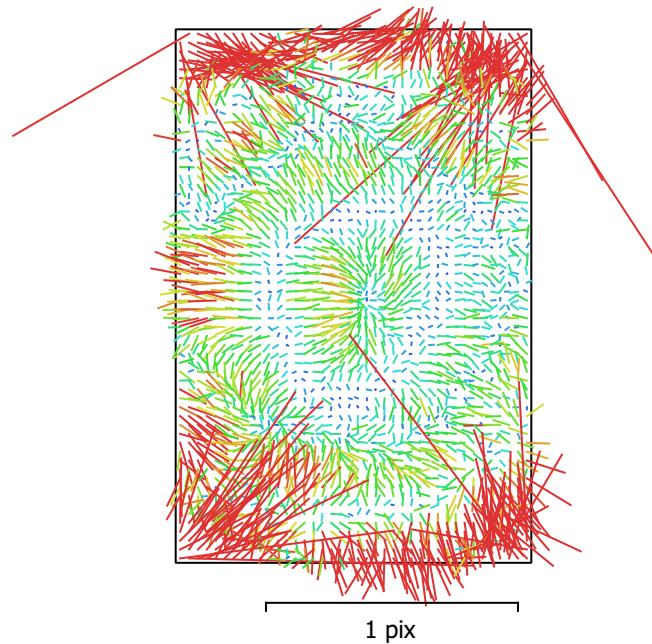


Fig. 10. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15mm).

Canon EOS M100 (15mm)

209 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4154.79 | 0.019 | 1.00 | -0.01 | 0.03 | -0.27 | 0.30 | -0.27 | -0.03 | 0.01 |
| Cx | -0.243109 | 0.03 | | 1.00 | 0.02 | 0.01 | -0.01 | 0.00 | 0.81 | 0.02 |
| Cy | 6.81409 | 0.036 | | | 1.00 | 0.02 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.91 |
| K1 | -0.139661 | 2.1e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | 0.02 |
| K2 | 0.128375 | 7.7e-05 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | -0.02 |
| K3 | -0.0473182 | 8.1e-05 | | | | | | 1.00 | 0.00 | 0.02 |
| P1 | -0.000190345 | 1.5e-06 | | | | | | | 1.00 | -0.01 |
| P2 | 0.000146422 | 1.9e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 10. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

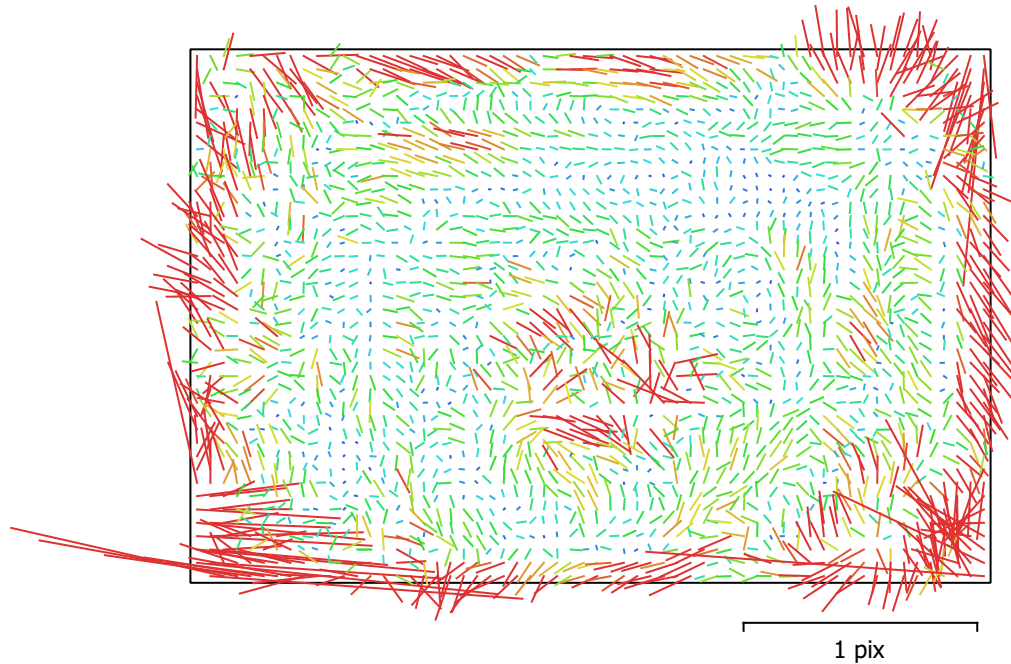


Fig. 11. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15mm).

Canon EOS M100 (15mm)

33 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| F | 4172.8 | 0.11 | 1.00 | 0.12 | -0.35 | 0.20 | 0.08 | -0.06 | 0.08 | 0.08 |
| Cx | 29.405 | 0.092 | | 1.00 | -0.03 | -0.00 | 0.02 | -0.00 | 0.87 | 0.13 |
| Cy | -9.23148 | 0.1 | | | 1.00 | -0.16 | -0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.70 |
| K1 | -0.133811 | 3.7e-05 | | | | 1.00 | -0.90 | 0.83 | 0.00 | -0.04 |
| K2 | 0.108989 | 0.0001 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | -0.03 |
| K3 | -0.027843 | 9.3e-05 | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.04 |
| P1 | 0.00123735 | 5e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.17 |
| P2 | 0.000405863 | 5.9e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 11. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

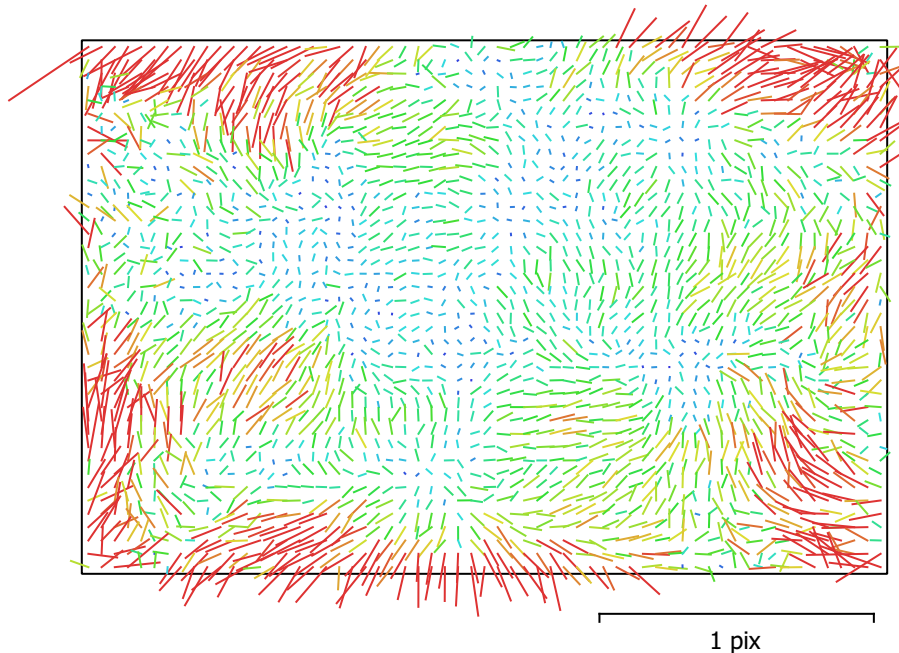


Fig. 12. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

1273 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3794.99 | 0.028 | 1.00 | 0.01 | -0.10 | -0.16 | 0.21 | -0.19 | -0.00 | -0.12 |
| Cx | 2.89988 | 0.062 | | 1.00 | -0.02 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.92 | -0.03 |
| Cy | -2.68764 | 0.062 | | | 1.00 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | -0.02 | 0.91 |
| K1 | -0.0979951 | 2.8e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | -0.00 | -0.00 |
| K2 | 0.0566026 | 0.00011 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | -0.00 |
| K3 | -0.016712 | 0.00013 | | | | | | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| P1 | -0.000537802 | 3.2e-06 | | | | | | | 1.00 | -0.03 |
| P2 | 0.000767705 | 2.9e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 12. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

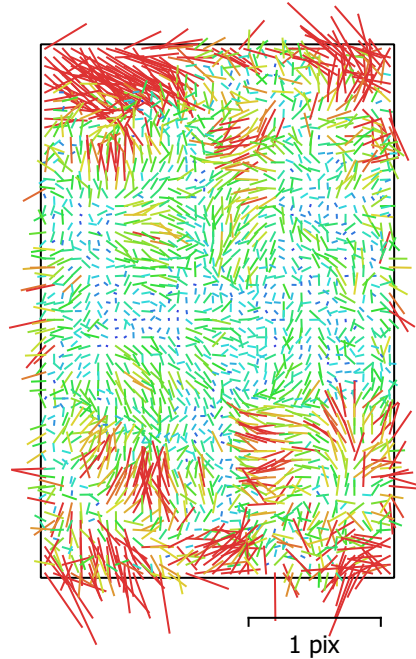


Fig. 13. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

163 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3789.91 | 0.066 | 1.00 | -0.02 | 0.00 | -0.27 | 0.29 | -0.26 | 0.00 | -0.00 |
| Cx | -7.87285 | 0.11 | | 1.00 | -0.08 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.84 | -0.10 |
| Cy | 12.5796 | 0.12 | | | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.00 | -0.06 | 0.88 |
| K1 | -0.099577 | 8e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | -0.00 | 0.00 |
| K2 | 0.0599394 | 0.00033 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.00 | -0.00 |
| K3 | -0.025795 | 0.00039 | | | | | | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| P1 | 0.000389449 | 6.3e-06 | | | | | | | 1.00 | -0.09 |
| P2 | 0.000991977 | 6.5e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 13. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

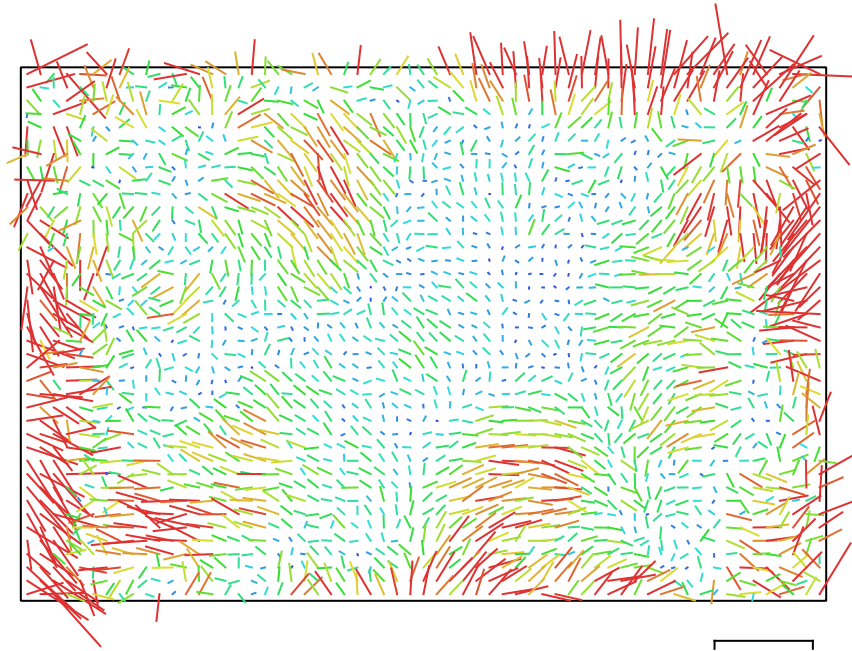


Fig. 14. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (20mm).

PENTAX K-50 (20mm)

101 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4006.02 | 0.062 | 1.00 | 0.07 | -0.00 | -0.32 | 0.30 | -0.27 | 0.03 | -0.04 |
| Cx | 29.227 | 0.15 | | 1.00 | -0.01 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | 0.90 | 0.01 |
| Cy | 3.25131 | 0.13 | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.86 |
| K1 | -0.0955081 | 0.0001 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.90 | 0.01 | 0.02 |
| K2 | 0.0609725 | 0.00048 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.01 | -0.01 |
| K3 | -0.0229402 | 0.00066 | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.01 |
| P1 | 6.75834e-05 | 8.5e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.03 |
| P2 | 0.00121424 | 7.6e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 14. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

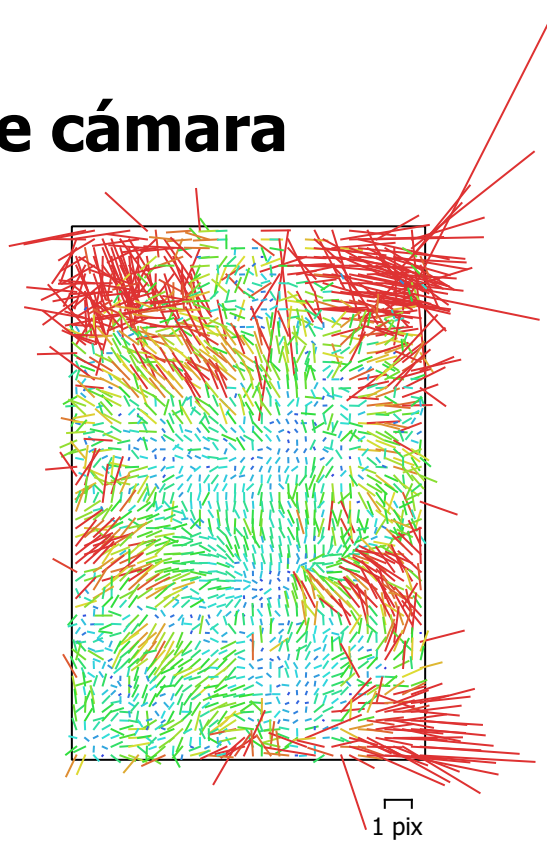


Fig. 15. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (20mm).

PENTAX K-50 (20mm)

4 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 20 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3986.13 | 0.53 | 1.00 | 0.13 | -0.16 | -0.26 | 0.24 | -0.23 | -0.21 | -0.04 |
| Cx | -5.59376 | 0.72 | | 1.00 | -0.07 | 0.02 | 0.00 | -0.03 | 0.70 | -0.11 |
| Cy | 1.70607 | 0.81 | | | 1.00 | -0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.87 |
| K1 | -0.10064 | 0.0006 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.89 | -0.02 | -0.07 |
| K2 | 0.0339284 | 0.0026 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.03 | 0.02 |
| K3 | 0.0318736 | 0.0032 | | | | | | 1.00 | -0.02 | 0.01 |
| P1 | -0.00109766 | 3.9e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.05 |
| P2 | -0.000188542 | 4.8e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 15. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

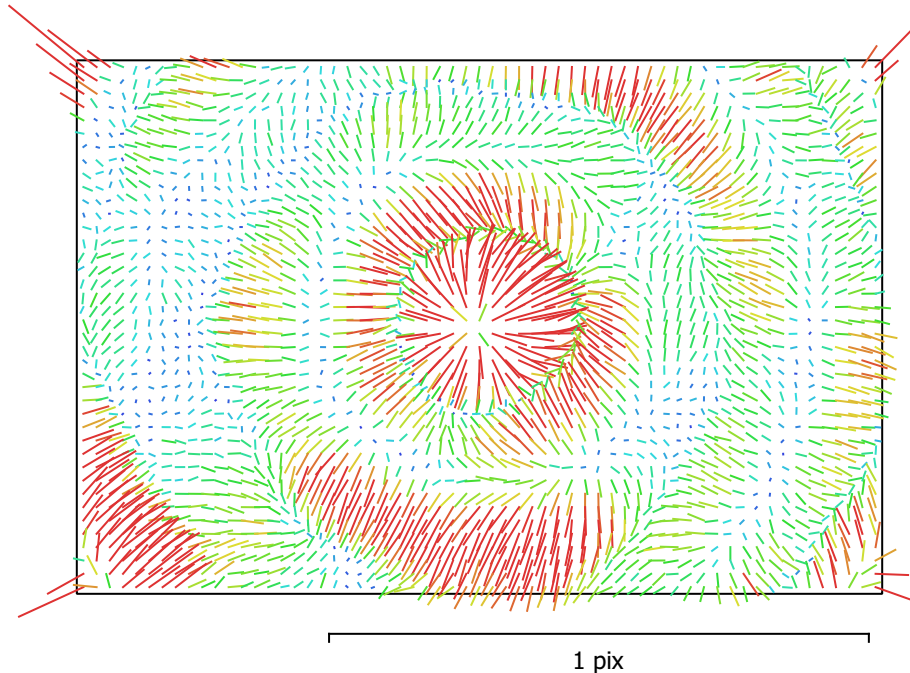


Fig. 16. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

496 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3791.09 | 0.0063 | 1.00 | 0.00 | -0.02 | -0.56 | -0.01 | -0.25 | 0.25 | -0.23 | 0.22 | 0.01 | -0.19 |
| Cx | 13.0117 | 0.012 | | 1.00 | 0.05 | -0.00 | 0.08 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.92 | 0.03 |
| Cy | -18.9985 | 0.0088 | | | 1.00 | -0.36 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.78 |
| B1 | 1.3668 | 0.0047 | | | | 1.00 | 0.01 | -0.02 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | -0.02 |
| B2 | 0.993384 | 0.0045 | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.00 | -0.00 | -0.11 | -0.01 |
| K1 | -0.105161 | 1e-05 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.88 | 0.01 | 0.00 |
| K2 | 0.0902577 | 6.2e-05 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.01 | -0.00 |
| K3 | -0.0740551 | 0.00015 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | -0.00 |
| K4 | 0.0421266 | 0.00012 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.00 |
| P1 | -0.000353028 | 6e-07 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.03 |
| P2 | 0.00026738 | 3.7e-07 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 16. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

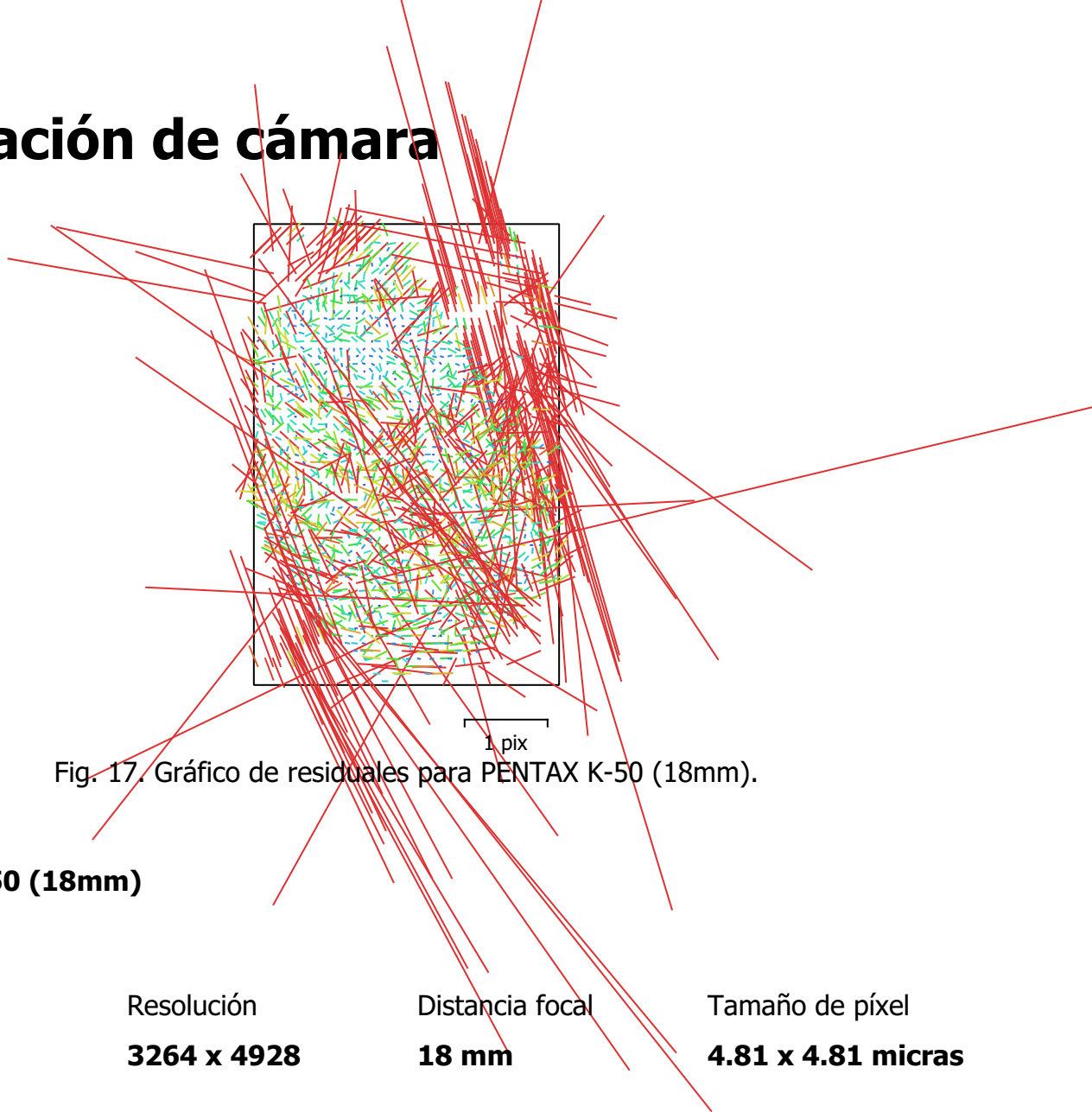


Fig. 17. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

1 imágenes

Tipo

Resolución

Distancia focal

Tamaño de píxel

Cuadro

3264 x 4928

18 mm

4.81 x 4.81 micras

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3798.72 | 0.21 | 1.00 | -0.28 | 0.43 | -0.03 | 0.42 | -0.47 | 0.50 | -0.48 | 0.44 | 0.13 | 0.29 |
| Cx | -6.197 | 0.32 | | 1.00 | -0.46 | 0.22 | -0.68 | -0.09 | 0.07 | -0.08 | 0.09 | 0.74 | -0.33 |
| Cy | 55.9875 | 0.39 | | | 1.00 | 0.23 | 0.67 | 0.06 | 0.01 | -0.02 | 0.03 | -0.08 | 0.91 |
| B1 | -2.37157 | 0.055 | | | | 1.00 | 0.12 | -0.04 | 0.06 | -0.06 | 0.05 | 0.33 | 0.14 |
| B2 | 5.819 | 0.076 | | | | | 1.00 | 0.10 | -0.07 | 0.08 | -0.08 | -0.25 | 0.54 |
| K1 | -0.116561 | 0.00069 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.87 | -0.09 | 0.04 |
| K2 | 0.153355 | 0.0051 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | 0.14 | 0.02 |
| K3 | -0.133046 | 0.015 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.17 | -0.02 |
| K4 | -0.0353364 | 0.014 | | | | | | | | | 1.00 | 0.17 | 0.03 |
| P1 | 5.27262e-05 | 1.8e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.08 |
| P2 | -0.000442351 | 2.7e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 17. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

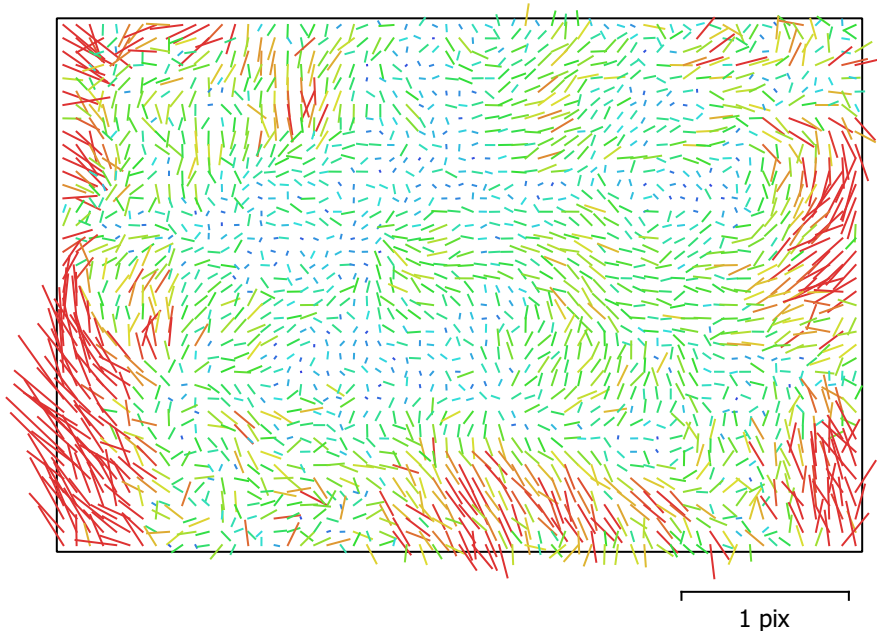


Fig. 18. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

328 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3798.69 | 0.051 | 1.00 | 0.05 | -0.36 | -0.18 | 0.22 | -0.20 | 0.04 | -0.26 |
| Cx | 6.12705 | 0.1 | | 1.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.94 | 0.03 |
| Cy | -6.71968 | 0.12 | | | 1.00 | -0.05 | 0.02 | -0.02 | 0.03 | 0.92 |
| K1 | -0.0980351 | 5.1e-05 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.91 | 0.00 | -0.03 |
| K2 | 0.0610892 | 0.0002 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | 0.01 |
| K3 | -0.0217068 | 0.00022 | | | | | | 1.00 | 0.00 | -0.01 |
| P1 | -0.000799978 | 5.2e-06 | | | | | | | 1.00 | 0.03 |
| P2 | 0.000459853 | 5.4e-06 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 18. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

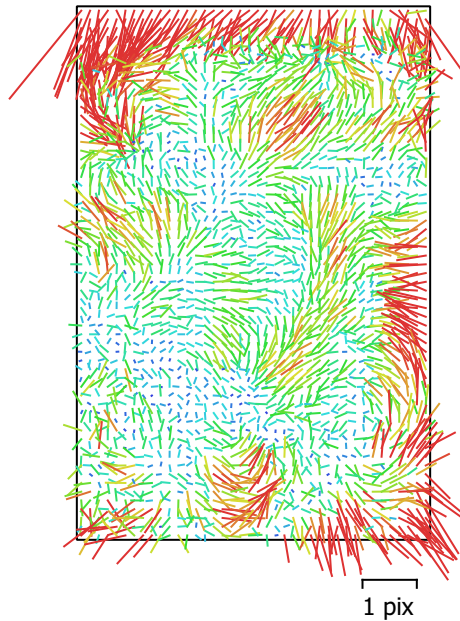


Fig. 19. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (18mm).

PENTAX K-50 (18mm)

35 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 18 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3767.82 | 0.13 | 1.00 | 0.10 | 0.03 | -0.30 | 0.31 | -0.29 | 0.17 | -0.04 |
| Cx | -8.17336 | 0.19 | | 1.00 | -0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.03 |
| Cy | 21.4606 | 0.19 | | | 1.00 | 0.02 | -0.00 | -0.00 | -0.02 | 0.87 |
| K1 | -0.0978093 | 0.00015 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.91 | -0.01 | 0.02 |
| K2 | 0.0603415 | 0.00058 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.01 | -0.01 |
| K3 | -0.0255248 | 0.00067 | | | | | | 1.00 | -0.00 | 0.01 |
| P1 | 3.69079e-06 | 9.4e-06 | | | | | | | 1.00 | -0.02 |
| P2 | 0.00142383 | 1.1e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 19. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

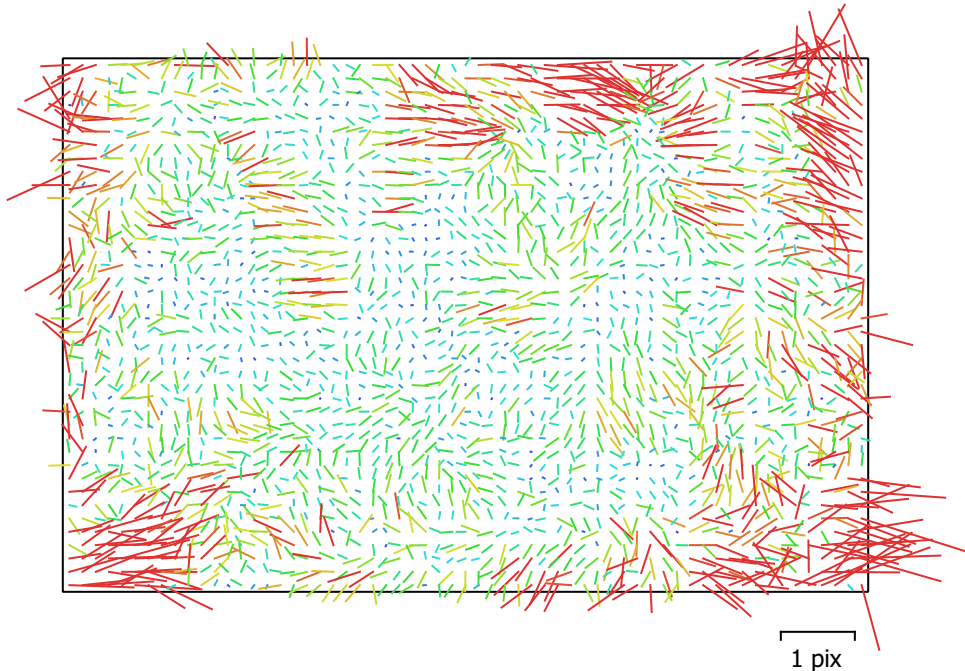


Fig. 20. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (23.13mm).

PENTAX K-50 (23.13mm)

37 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4928 x 3264 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|-------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4628.64 | 0.26 | 1.00 | -0.06 | -0.18 | -0.26 | 0.27 | -0.25 | 0.00 | 0.09 |
| Cx | 8.22632 | 0.41 | | 1.00 | 0.04 | -0.01 | -0.00 | 0.01 | 0.89 | 0.04 |
| Cy | 8.83141 | 0.38 | | | 1.00 | -0.03 | 0.01 | -0.00 | 0.01 | 0.76 |
| K1 | -0.0878732 | 0.00036 | | | | 1.00 | -0.97 | 0.91 | -0.01 | -0.04 |
| K2 | 0.0564741 | 0.0021 | | | | | 1.00 | -0.98 | -0.00 | 0.02 |
| K3 | 0.013528 | 0.0036 | | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 |
| P1 | 0.00101314 | 2.2e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.04 |
| P2 | 0.00018513 | 2e-05 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 20. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara



Fig. 21. Gráfico de residuales para PENTAX K-50 (23.13mm).

PENTAX K-50 (23.13mm)

3 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3264 x 4928 | 23.13 mm | 4.81 x 4.81 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4633.3 | 0.97 | 1.00 | 0.16 | 0.28 | -0.62 | 0.58 | -0.53 | 0.08 | 0.20 |
| Cx | -28.6501 | 1.6 | | 1.00 | -0.01 | -0.04 | 0.02 | -0.02 | 0.81 | 0.18 |
| Cy | 12.3193 | 1.7 | | | 1.00 | -0.23 | 0.20 | -0.16 | 0.15 | 0.87 |
| K1 | -0.0744175 | 0.0019 | | | | 1.00 | -0.96 | 0.91 | -0.11 | -0.22 |
| K2 | 0.0743825 | 0.011 | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.04 | 0.13 |
| K3 | -0.0438439 | 0.02 | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.09 |
| P1 | -0.00235778 | 8.6e-05 | | | | | | | 1.00 | 0.32 |
| P2 | 0.00053038 | 0.00011 | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 21. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Puntos de control terrestre

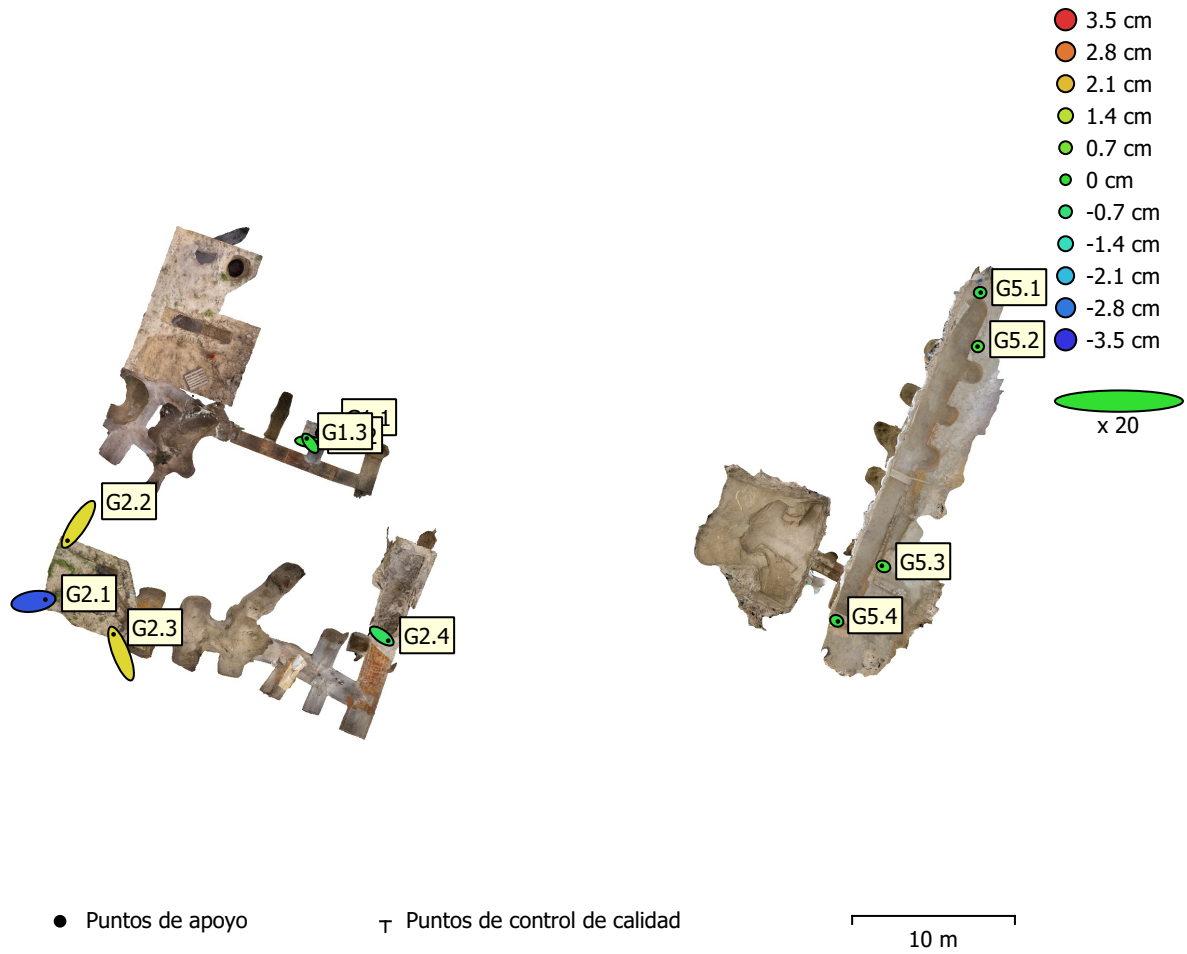


Fig. 22. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

| Número | Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Error en XY (cm) | Total (cm) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|
| 11 | 4.01265 | 4.89971 | 1.24123 | 6.33313 | 6.45362 |

Tabla 22. ECM de puntos de apoyo.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

| Nombre | Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Total (cm) | Imagen (pix) |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| G1.1 | -2.99224 | -2.43011 | 0.0646542 | 3.85527 | 0.004 (27) |
| G1.2 | 5.20378 | -0.464264 | 0.0442535 | 5.22464 | 0.004 (15) |
| G1.3 | -2.21155 | 2.89431 | -0.10887 | 3.64415 | 0.004 (21) |
| G2.1 | 7.32095 | 1.1083 | -3.15931 | 8.0502 | 0.005 (7) |
| G2.2 | -6.67626 | -10.0476 | 1.79218 | 12.1958 | 0.050 (5) |
| G2.3 | -4.58755 | 11.7904 | 1.82721 | 12.7827 | 0.004 (24) |
| G2.4 | 3.94286 | -2.85115 | -0.460078 | 4.88743 | 0.004 (5) |
| G5.1 | 0.370879 | 0.0176362 | -0.245675 | 0.445217 | 0.083 (34) |
| G5.2 | -0.217319 | -0.0306846 | 0.244834 | 0.328805 | 0.221 (23) |
| G5.3 | -0.862333 | 0.363955 | 0.181101 | 0.953352 | 2.733 (23) |
| G5.4 | 0.708733 | -0.350981 | -0.180255 | 0.81116 | 0.277 (18) |
| Total | 4.01265 | 4.89971 | 1.24123 | 6.45362 | 0.930 |

Tabla 23. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

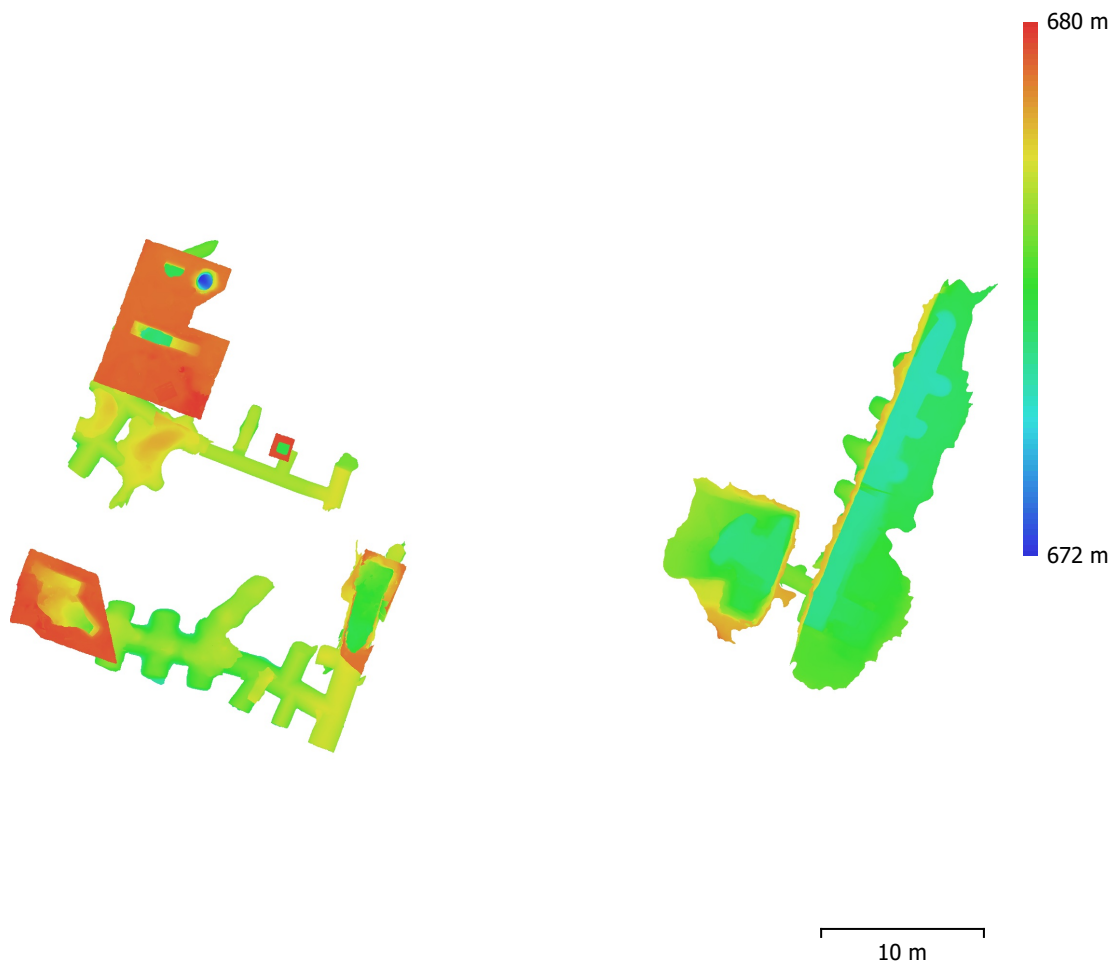


Fig. 23. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 2.87 cm/pix
Densidad de puntos: 0.121 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

| | |
|------------------------|-------------------------------------|
| Cámaras | 5123 |
| Cámaras orientadas | 5122 |
| Marcadores | 11 |
| Sistema de coordenadas | ETRS89 / UTM zone 30N (EPSG::25830) |
| Ángulo de rotación | Guiñada, cabeceo, alabeo |

Puntos de paso

| | |
|---|--------------------------|
| Puntos | 35,324,289 de 40,152,297 |
| RMS error de reproyección | 0.419898 (1.67636 pix) |
| Error de reproyección máximo | 1.99091 (106.31 pix) |
| Tamaño promedio de puntos característicos | 4.23045 pix |
| Colores de puntos | 3 bandas, uint8 |
| Puntos clave | No |
| Multiplicidad media de puntos de paso | 3.11469 |
| Tamaño de archivo | 2.77 GB |

Mapas de profundidad

| | |
|--------|------|
| Número | 5120 |
|--------|------|

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |
| Tiempo de procesamiento | 7 horas 33 minutos |
| Uso de memoria | 12.18 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:12 05:44:26 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 14.31 GB |

Modelo

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| Caras | 1,141,753 |
| Vértices | 570,625 |
| Colores de vértices | 3 bandas, uint8 |
| Textura | 4,096 x 4,096, 4 bandas, uint8 |

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |
| Tiempo de procesamiento | 7 horas 33 minutos |
| Uso de memoria | 12.18 GB |

Parámetros de reconstrucción

| | |
|---------------------------------|----------------------|
| Tipo de superficie | Arbitrario |
| Origen de datos | Mapas de profundidad |
| Interpolación | Habilitada |
| Máscaras volumétricas estrictas | No |
| Tiempo de procesamiento | 4 horas 32 minutos |
| Uso de memoria | 19.56 GB |

Parámetros de texturizado

| | |
|--|----------|
| Modo de mapeado | Genérico |
| Modo de mezcla | Mosaico |
| Tamaño de textura | 4,096 |
| Habilitar el cierre de agujeros | No |
| Habilitar el filtro de efecto fantasma | Sí |

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Tiempo de mapeado en UV | 1 minuto 24 segundos |
| uso de memoria para mapa UV | 2.60 GB |
| Tiempo de mezcla | 49 segundos |
| Uso de memoria durante la mezcla | 10.86 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:12 10:08:12 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 109.44 MB |

Sistema

| | |
|----------------------|---|
| Nombre del programa | Agisoft Metashape Professional |
| Versión del programa | 2.1.0 build 17214 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 31.70 GB |
| CPU | 12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900H |
| GPU(s) | Intel(R) Iris(R) Xe Graphics NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti Laptop GPU |

Anexo IV. Pozo Viejo, Corral de Almaguer - 2024

Reprocesado de datos en un único bloque. Georreferenciación basada en el sistema RTK del DJI Phantom 4 Pro y secundada por GCP obtenidos por receptor RTK.

18 August 2024



Datos del levantamiento

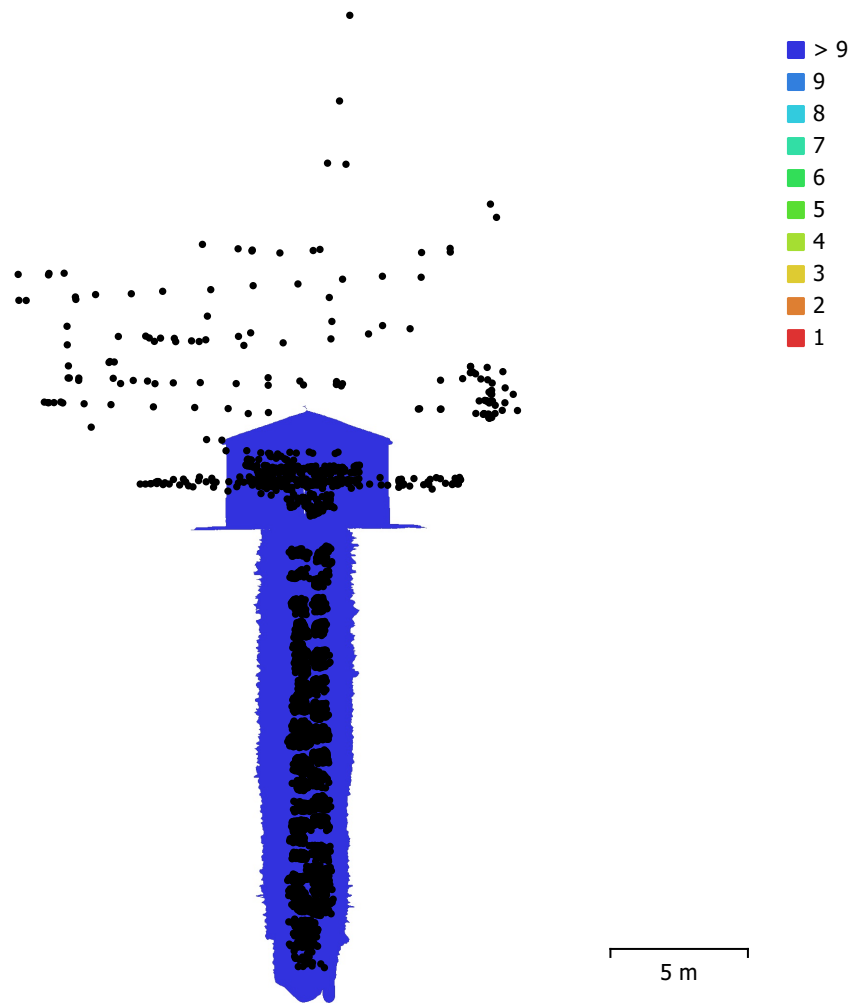


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 2,871

Altitud media de vuelo: 1.64 m

Resolución en terreno: 0.394 mm/pix

Área cubierta: 77.2 m²

Imágenes alineadas: 2,835

Puntos de paso: 2,766,446

Proyecciones: 13,107,251

Error de reproyección: 2.13 pix

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|------------------------|-------------|-----------------|--------------------|--------------|
| FC6310 (8.8 mm) | 4864 x 3648 | 8.8 mm | 2.61 x 2.61 micras | No |
| Canon EOS M100 (15...) | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15...) | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15...) | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15...) | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |

| Modelo de cámara | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel | Precalibrada |
|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| Canon EOS M100 (15... | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 3368 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (15... | 6000 x 3368 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (16... | 3368 x 6000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (16... | 6000 x 3368 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (16... | 4000 x 6000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (16... | 6000 x 4000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |
| Canon EOS M100 (28... | 4000 x 6000 | 28 mm | 3.72 x 3.72 micras | No |

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

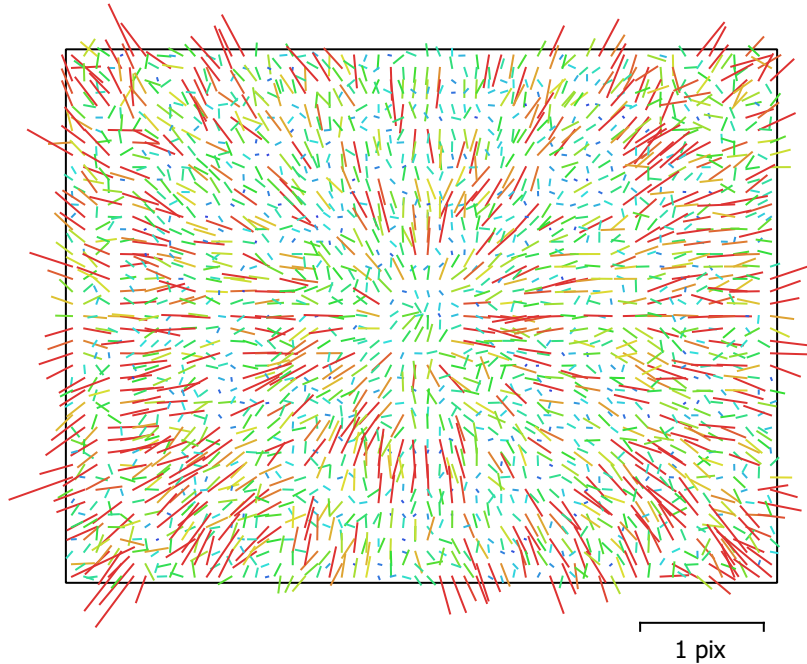


Fig. 2. Gráfico de residuales para FC6310 (8.8 mm).

FC6310 (8.8 mm)

159 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4864 x 3648 | 8.8 mm | 2.61 x 2.61 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 3645.87 | 0.034 | 1.00 | -0.01 | -0.25 | -0.36 | 0.02 | -0.28 | 0.29 | -0.26 | 0.24 | 0.01 | -0.24 |
| Cx | 3.17631 | 0.058 | | 1.00 | -0.06 | 0.01 | 0.01 | -0.02 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.94 | -0.08 |
| Cy | -3.46628 | 0.052 | | | 1.00 | -0.04 | 0.04 | -0.03 | 0.01 | -0.00 | 0.00 | -0.07 | 0.87 |
| B1 | -0.138338 | 0.016 | | | | 1.00 | 0.02 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 | 0.12 |
| B2 | 0.496035 | 0.013 | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | -0.09 | 0.00 |
| K1 | 0.0135346 | 6.1e-05 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.91 | -0.86 | -0.01 | -0.03 |
| K2 | -0.0842379 | 0.00036 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | -0.00 | 0.00 |
| K3 | 0.166359 | 0.00083 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.00 |
| K4 | -0.1116 | 0.00065 | | | | | | | | | 1.00 | -0.00 | -0.00 |
| P1 | 0.000307573 | 4.6e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.08 |
| P2 | -0.000703027 | 3.7e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

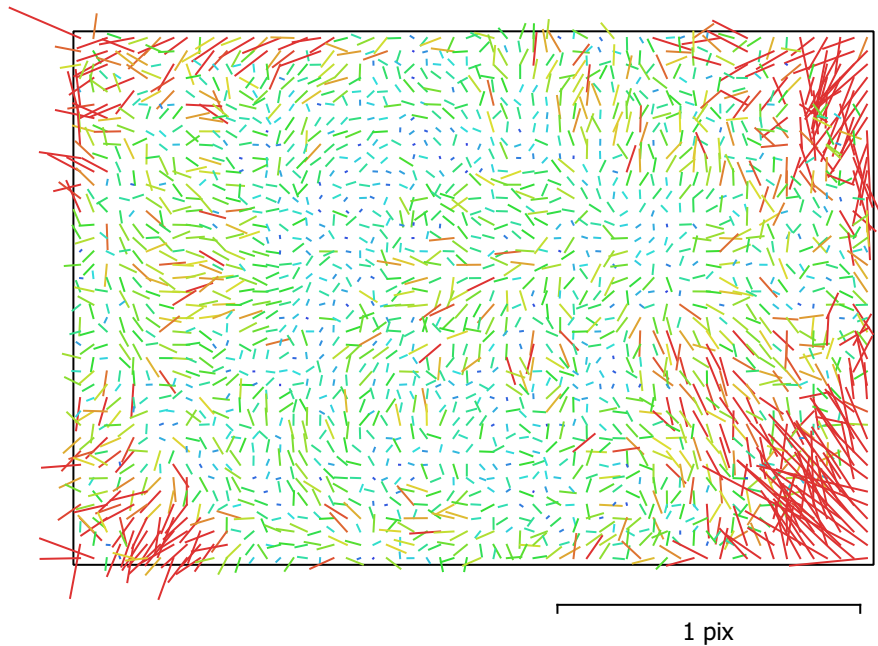


Fig. 3. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

408 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4160.55 | 0.021 | 1.00 | 0.15 | -0.08 | -0.16 | 0.02 | -0.51 | 0.47 | -0.42 | 0.39 | 0.07 | -0.05 |
| Cx | 30.6131 | 0.03 | | 1.00 | -0.04 | -0.04 | 0.18 | 0.02 | -0.01 | 0.01 | -0.02 | 0.88 | -0.02 |
| Cy | -11.076 | 0.027 | | | 1.00 | -0.15 | -0.07 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.04 | 0.83 |
| B1 | 0.435366 | 0.0079 | | | | 1.00 | -0.01 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.05 | -0.08 |
| B2 | -0.0841388 | 0.0077 | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.09 | 0.03 |
| K1 | -0.144282 | 4.1e-05 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.87 | 0.02 | 0.01 |
| K2 | 0.151478 | 0.00021 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | -0.01 | -0.01 |
| K3 | -0.113507 | 0.00042 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.00 |
| K4 | 0.0599994 | 0.00028 | | | | | | | | | 1.00 | -0.02 | 0.00 |
| P1 | 0.000557237 | 1.7e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.03 |
| P2 | 0.000121817 | 1.5e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 3. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

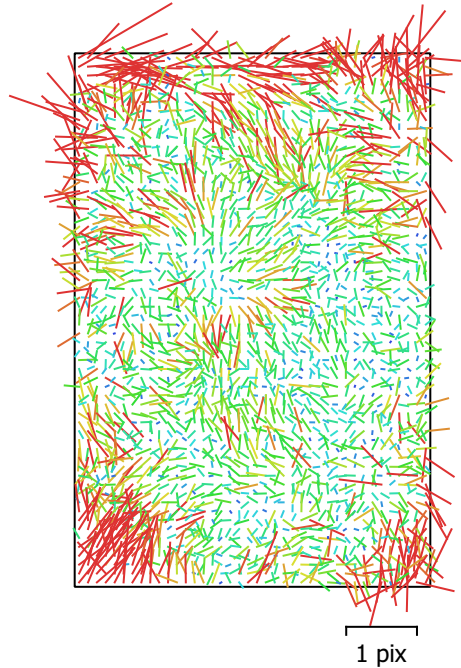


Fig. 4. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

23 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4160.3 | 0.089 | 1.00 | 0.14 | 0.01 | -0.08 | -0.06 | -0.57 | 0.54 | -0.49 | 0.44 | 0.04 | -0.03 |
| Cx | 13.7886 | 0.12 | | 1.00 | 0.06 | -0.00 | 0.05 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.81 | 0.03 |
| Cy | 42.1196 | 0.15 | | | 1.00 | 0.06 | -0.11 | 0.06 | -0.06 | 0.06 | -0.06 | 0.02 | 0.93 |
| B1 | -0.478151 | 0.026 | | | | 1.00 | -0.00 | -0.04 | 0.05 | -0.04 | 0.04 | -0.00 | 0.05 |
| B2 | 0.104338 | 0.025 | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.05 | -0.09 |
| K1 | -0.142816 | 0.00023 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.87 | -0.03 | 0.05 |
| K2 | 0.145347 | 0.0012 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | 0.01 | -0.05 |
| K3 | -0.0983414 | 0.0023 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.00 | 0.05 |
| K4 | 0.0488105 | 0.0016 | | | | | | | | | 1.00 | -0.00 | -0.05 |
| P1 | 0.000228505 | 7.5e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.02 |
| P2 | 0.00124539 | 9.5e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 4. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

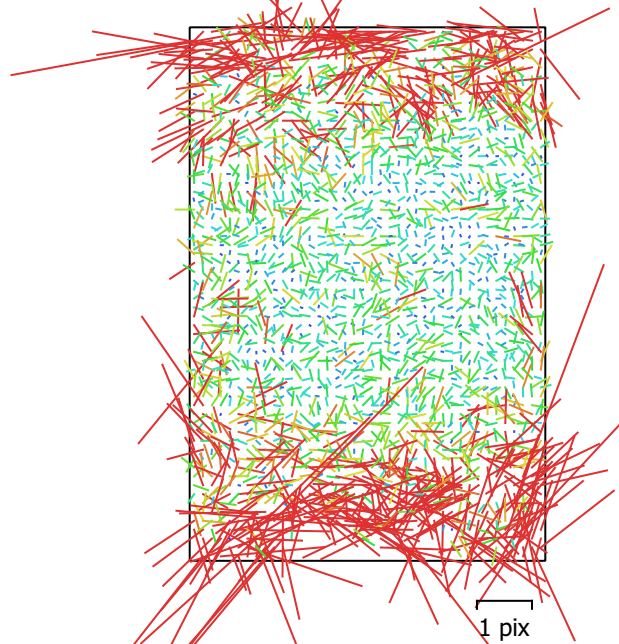


Fig. 5. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

12 imágenes

Tipo **Cuadro** Resolución **4000 x 6000** Distancia focal **15 mm** Tamaño de píxel **3.72 x 3.72 micras**

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4154.77 | 0.17 | 1.00 | 0.08 | -0.07 | 0.08 | 0.02 | -0.47 | 0.44 | -0.41 | 0.38 | 0.03 | -0.09 |
| Cx | -4.7374 | 0.18 | | 1.00 | 0.02 | -0.01 | -0.10 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.80 | -0.00 |
| Cy | -13.5262 | 0.23 | | | 1.00 | 0.01 | -0.06 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | -0.00 | 0.07 | 0.85 |
| B1 | 2.16369 | 0.046 | | | | 1.00 | -0.05 | -0.01 | 0.02 | -0.01 | 0.00 | -0.02 | -0.08 |
| B2 | -0.420309 | 0.043 | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.01 | -0.00 | 0.00 | 0.06 | -0.04 |
| K1 | -0.148132 | 0.00037 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.87 | -0.00 | -0.00 |
| K2 | 0.184528 | 0.002 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | -0.01 | 0.00 |
| K3 | -0.188673 | 0.0043 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.00 |
| K4 | 0.114862 | 0.0031 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.01 |
| P1 | -0.000147758 | 1.1e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.05 |
| P2 | -0.000955004 | 1.2e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 5. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

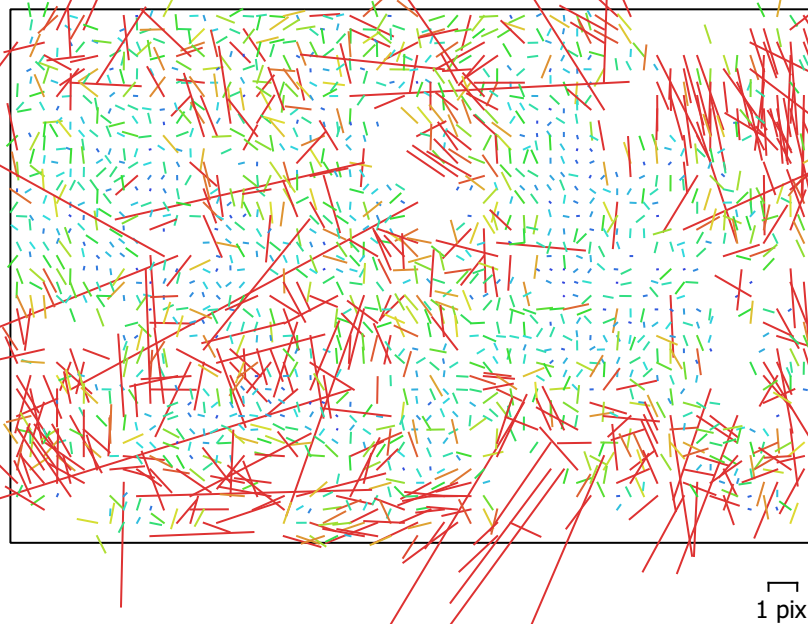


Fig. 6. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

3 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4164.25 | 0.48 | 1.00 | -0.10 | 0.31 | -0.04 | 0.01 | -0.50 | 0.43 | -0.37 | 0.32 | -0.04 | -0.04 |
| Cx | 9.35878 | 0.52 | | 1.00 | 0.05 | 0.30 | -0.24 | 0.07 | -0.05 | 0.03 | -0.02 | 0.82 | -0.21 |
| Cy | 18.8608 | 0.48 | | | 1.00 | 0.44 | -0.10 | 0.12 | -0.13 | 0.14 | -0.15 | -0.02 | 0.17 |
| B1 | 1.53663 | 0.14 | | | | 1.00 | -0.16 | 0.13 | -0.12 | 0.10 | -0.08 | 0.20 | -0.33 |
| B2 | -4.0988 | 0.15 | | | | | 1.00 | -0.08 | 0.09 | -0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.11 |
| K1 | -0.151156 | 0.0011 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.87 | -0.02 | -0.07 |
| K2 | 0.199596 | 0.0058 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | 0.03 | 0.08 |
| K3 | -0.210868 | 0.012 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.03 | -0.08 |
| K4 | 0.125741 | 0.0078 | | | | | | | | | 1.00 | 0.03 | 0.08 |
| P1 | 0.000243522 | 3.2e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.19 |
| P2 | 0.00127046 | 2.1e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 6. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

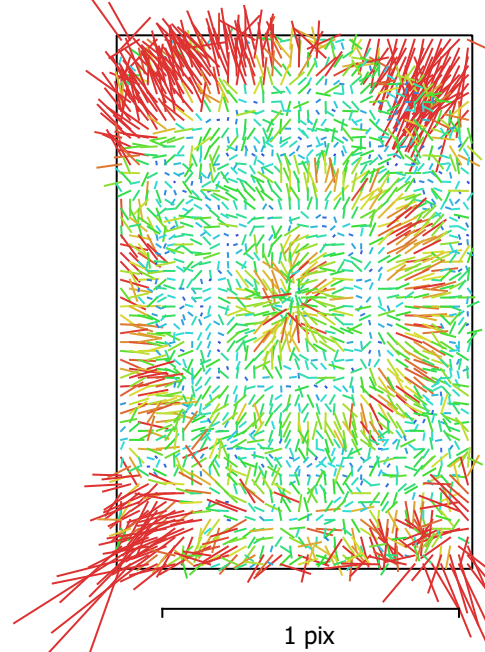


Fig. 7. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

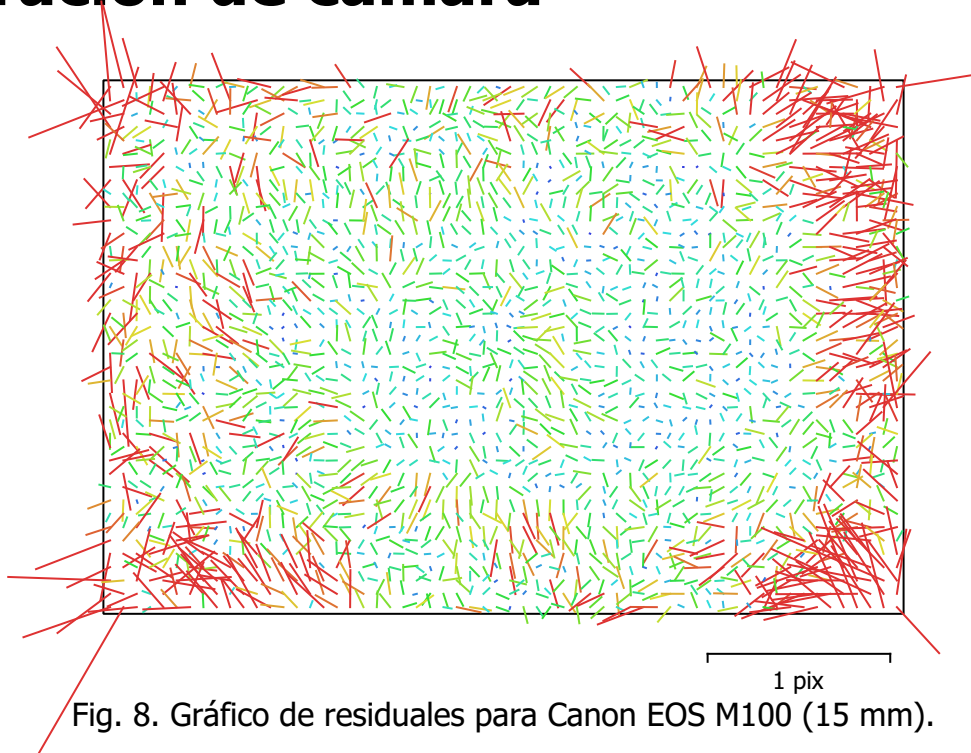
1742 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4000 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4154.79 | 0.016 | 1.00 | 0.02 | -0.05 | -0.12 | 0.02 | -0.47 | 0.43 | -0.40 | 0.37 | 0.00 | -0.04 |
| Cx | -2.0709 | 0.016 | | 1.00 | 0.16 | -0.02 | 0.01 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.73 | 0.13 |
| Cy | -12.2828 | 0.031 | | | 1.00 | 0.02 | -0.01 | -0.01 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.90 |
| B1 | 0.45095 | 0.0099 | | | | 1.00 | -0.07 | -0.00 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |
| B2 | -0.8885 | 0.0081 | | | | | 1.00 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.01 | -0.00 |
| K1 | -0.144587 | 3.2e-05 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.88 | -0.00 | -0.01 |
| K2 | 0.164967 | 0.00017 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | 0.00 | 0.02 |
| K3 | -0.146864 | 0.00034 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.00 | -0.02 |
| K4 | 0.0845472 | 0.00023 | | | | | | | | | 1.00 | 0.00 | 0.02 |
| P1 | 0.000123575 | 7.9e-07 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.09 |
| P2 | -0.000465185 | 1.3e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 7. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara



Canon EOS M100 (15 mm)

306 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4154.49 | 0.033 | 1.00 | -0.00 | 0.08 | -0.11 | -0.03 | -0.57 | 0.54 | -0.49 | 0.44 | -0.00 | 0.07 |
| Cx | 9.46372 | 0.048 | | 1.00 | 0.00 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.02 | 0.92 | 0.00 |
| Cy | 3.02783 | 0.047 | | | 1.00 | -0.04 | 0.00 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.84 |
| B1 | -0.392752 | 0.011 | | | | 1.00 | -0.02 | 0.03 | -0.03 | 0.03 | -0.02 | 0.01 | -0.08 |
| B2 | 0.254862 | 0.011 | | | | | 1.00 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.08 | 0.00 |
| K1 | -0.144251 | 8.1e-05 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.87 | 0.00 | -0.01 |
| K2 | 0.16129 | 0.00043 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.01 | 0.00 |
| K3 | -0.137504 | 0.00088 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | -0.00 |
| K4 | 0.0769295 | 0.0006 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.00 |
| P1 | 0.000482364 | 2.9e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.00 |
| P2 | 0.000358506 | 2.4e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 8. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

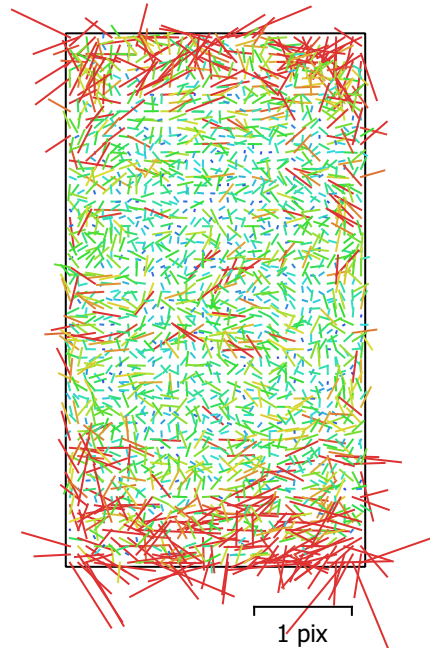


Fig. 9. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

85 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3368 x 6000 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4156.47 | 0.089 | 1.00 | -0.04 | -0.12 | -0.04 | -0.05 | -0.42 | 0.39 | -0.36 | 0.34 | -0.07 | -0.03 |
| Cx | 1.95434 | 0.08 | | 1.00 | 0.04 | -0.10 | 0.08 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.70 | 0.03 |
| Cy | -2.92508 | 0.12 | | | 1.00 | -0.09 | -0.04 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.89 |
| B1 | 1.15248 | 0.025 | | | | 1.00 | -0.04 | -0.01 | 0.03 | -0.03 | 0.02 | -0.06 | -0.07 |
| B2 | -1.03924 | 0.022 | | | | | 1.00 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | -0.03 |
| K1 | -0.148018 | 0.00018 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.87 | 0.01 | -0.00 |
| K2 | 0.180064 | 0.001 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.00 | 0.00 |
| K3 | -0.176359 | 0.0022 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.00 | 0.00 |
| K4 | 0.104611 | 0.0016 | | | | | | | | | 1.00 | -0.00 | -0.00 |
| P1 | 0.000126096 | 4.2e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.03 |
| P2 | -0.000426159 | 6.3e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 9. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

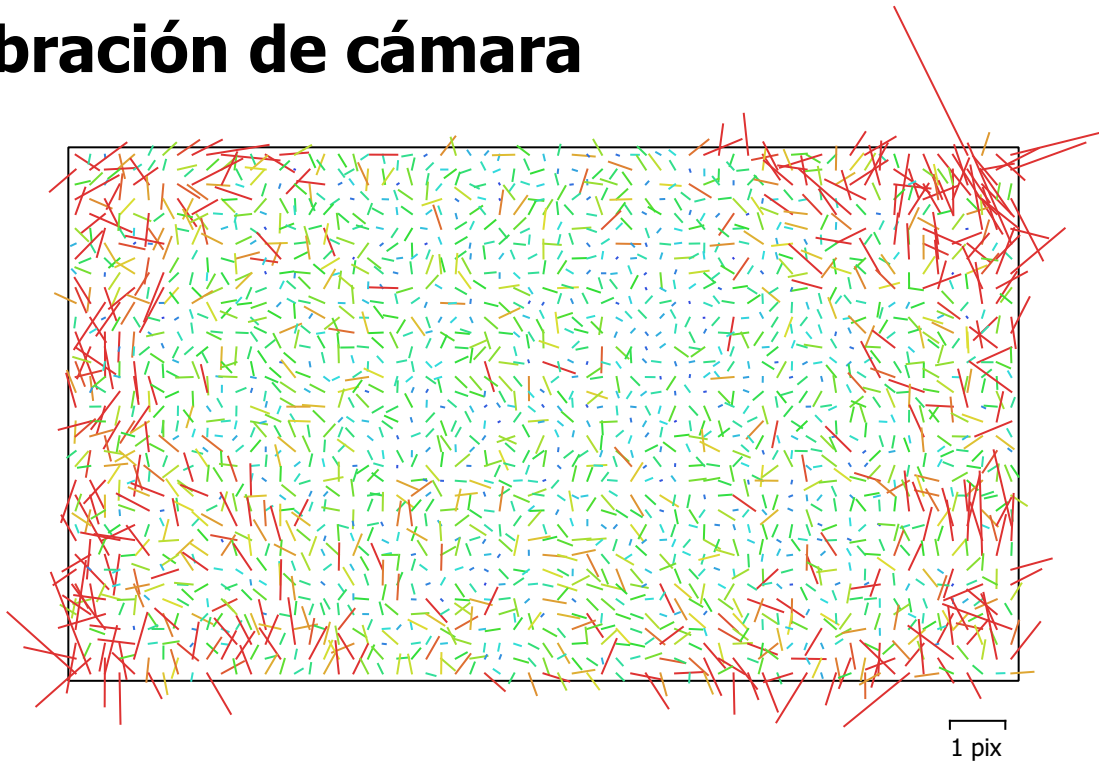


Fig. 10. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (15 mm).

Canon EOS M100 (15 mm)

33 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 3368 | 15 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4160.33 | 0.13 | 1.00 | -0.06 | -0.06 | -0.13 | -0.03 | -0.61 | 0.57 | -0.52 | 0.47 | -0.02 | -0.04 |
| Cx | 3.63845 | 0.2 | | 1.00 | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 0.00 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.95 | 0.03 |
| Cy | -7.98098 | 0.17 | | | 1.00 | -0.08 | 0.05 | -0.00 | -0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.79 |
| B1 | 0.637438 | 0.041 | | | | 1.00 | 0.02 | 0.03 | -0.04 | 0.04 | -0.04 | 0.09 | -0.04 |
| B2 | -0.459215 | 0.04 | | | | | 1.00 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | -0.00 | 0.01 | 0.07 |
| K1 | -0.149638 | 0.00035 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.88 | -0.00 | 0.01 |
| K2 | 0.185892 | 0.002 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.00 | -0.01 |
| K3 | -0.183936 | 0.0043 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.01 |
| K4 | 0.108858 | 0.0032 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.01 |
| P1 | 0.000107297 | 1.2e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.02 |
| P2 | -0.000408521 | 8.7e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 10. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

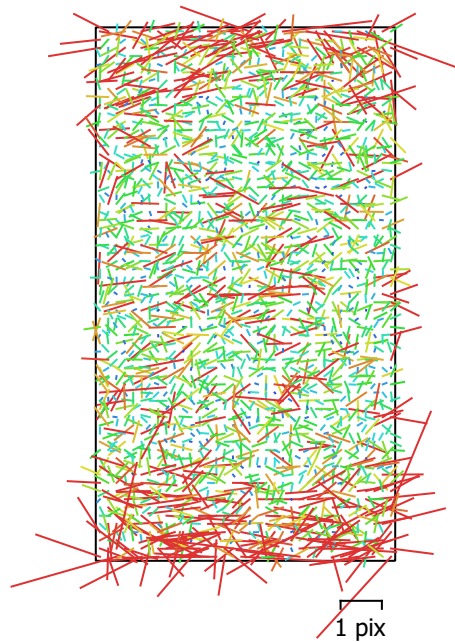


Fig. 11. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (16 mm).

Canon EOS M100 (16 mm)

19 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 3368 x 6000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4185.25 | 0.31 | 1.00 | -0.24 | -0.12 | 0.12 | -0.17 | -0.38 | 0.34 | -0.32 | 0.30 | 0.04 | -0.09 |
| Cx | 10.5735 | 0.2 | | 1.00 | 0.12 | 0.20 | 0.03 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.02 | 0.52 | 0.09 |
| Cy | 5.35734 | 0.3 | | | 1.00 | -0.03 | 0.27 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.04 | 0.85 |
| B1 | 0.911669 | 0.059 | | | | 1.00 | -0.07 | 0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.02 | -0.05 |
| B2 | -0.920124 | 0.054 | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.03 | 0.08 |
| K1 | -0.146169 | 0.00054 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.88 | 0.02 | 0.00 |
| K2 | 0.181606 | 0.003 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.01 | -0.00 |
| K3 | -0.182824 | 0.0065 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.00 |
| K4 | 0.111381 | 0.0048 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.01 |
| P1 | 0.000625975 | 1e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.03 |
| P2 | 0.000179607 | 1.6e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 11. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

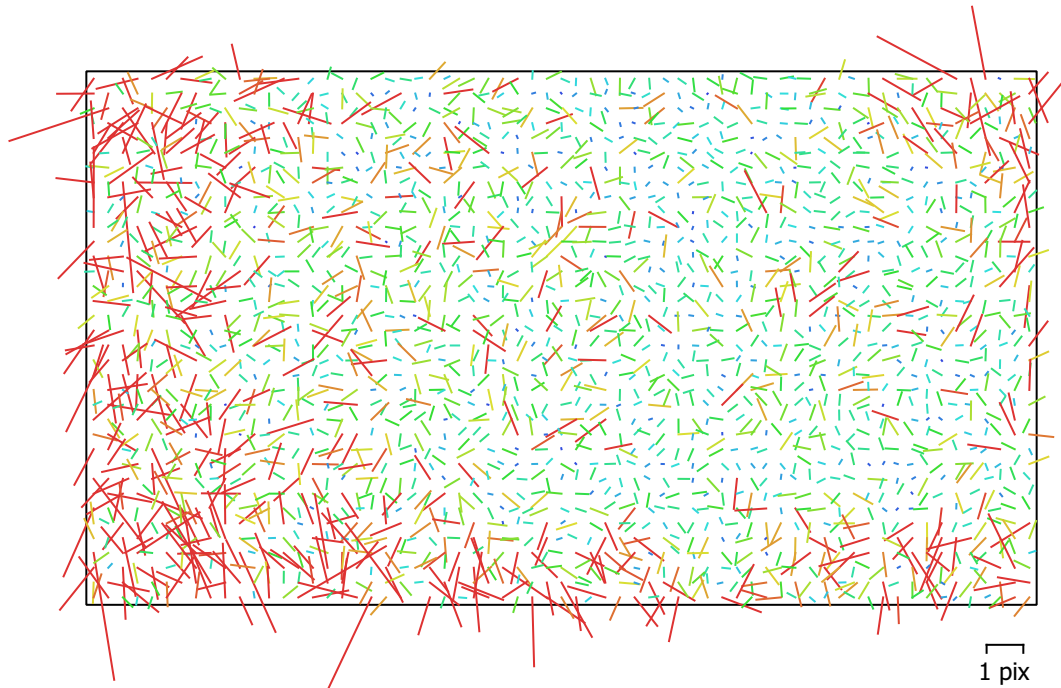


Fig. 12. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (16 mm).

Canon EOS M100 (16 mm)

12 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 3368 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4187.45 | 0.26 | 1.00 | -0.13 | -0.24 | -0.18 | -0.16 | -0.56 | 0.54 | -0.48 | 0.44 | 0.02 | -0.33 |
| Cx | 11.4388 | 0.33 | | 1.00 | -0.00 | 0.08 | -0.20 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.94 | 0.02 |
| Cy | 12.0417 | 0.32 | | | 1.00 | 0.36 | 0.33 | 0.01 | 0.00 | -0.01 | 0.01 | -0.03 | 0.87 |
| B1 | 0.60493 | 0.066 | | | | 1.00 | 0.05 | 0.03 | -0.04 | 0.03 | -0.03 | 0.05 | 0.34 |
| B2 | -0.960688 | 0.064 | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.21 | 0.30 |
| K1 | -0.146402 | 0.00061 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.88 | 0.00 | 0.03 |
| K2 | 0.179928 | 0.0034 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.00 | -0.03 |
| K3 | -0.174459 | 0.0075 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.02 |
| K4 | 0.103153 | 0.0055 | | | | | | | | | 1.00 | -0.00 | -0.01 |
| P1 | 0.000519968 | 2e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.03 |
| P2 | 0.000750218 | 1.8e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 12. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

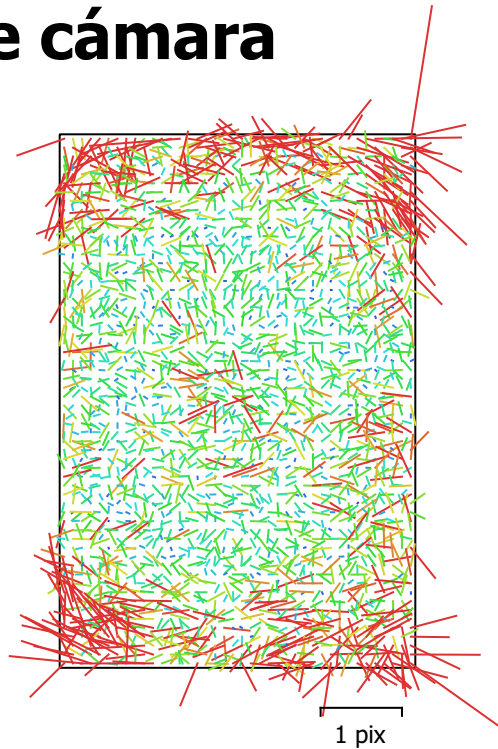


Fig. 13. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (16 mm).

Canon EOS M100 (16 mm)

58 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4000 x 6000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4194.94 | 0.1 | 1.00 | -0.06 | -0.01 | -0.21 | -0.02 | -0.49 | 0.45 | -0.41 | 0.39 | -0.03 | -0.07 |
| Cx | -12.0899 | 0.075 | | 1.00 | 0.09 | 0.03 | -0.06 | 0.00 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.66 | 0.07 |
| Cy | 4.27369 | 0.12 | | | 1.00 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.01 | -0.01 | 0.04 | 0.85 |
| B1 | 1.31772 | 0.027 | | | | 1.00 | 0.01 | -0.03 | 0.03 | -0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| B2 | 0.0610995 | 0.027 | | | | | 1.00 | -0.00 | 0.01 | -0.01 | 0.01 | -0.05 | -0.00 |
| K1 | -0.14253 | 0.00022 | | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.93 | -0.88 | 0.01 | 0.02 |
| K2 | 0.167011 | 0.0011 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.01 | -0.02 |
| K3 | -0.154978 | 0.0023 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | 0.02 |
| K4 | 0.0932888 | 0.0016 | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 | -0.02 |
| P1 | -0.000835882 | 4.4e-06 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.05 |
| P2 | -0.000132962 | 6.6e-06 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 13. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

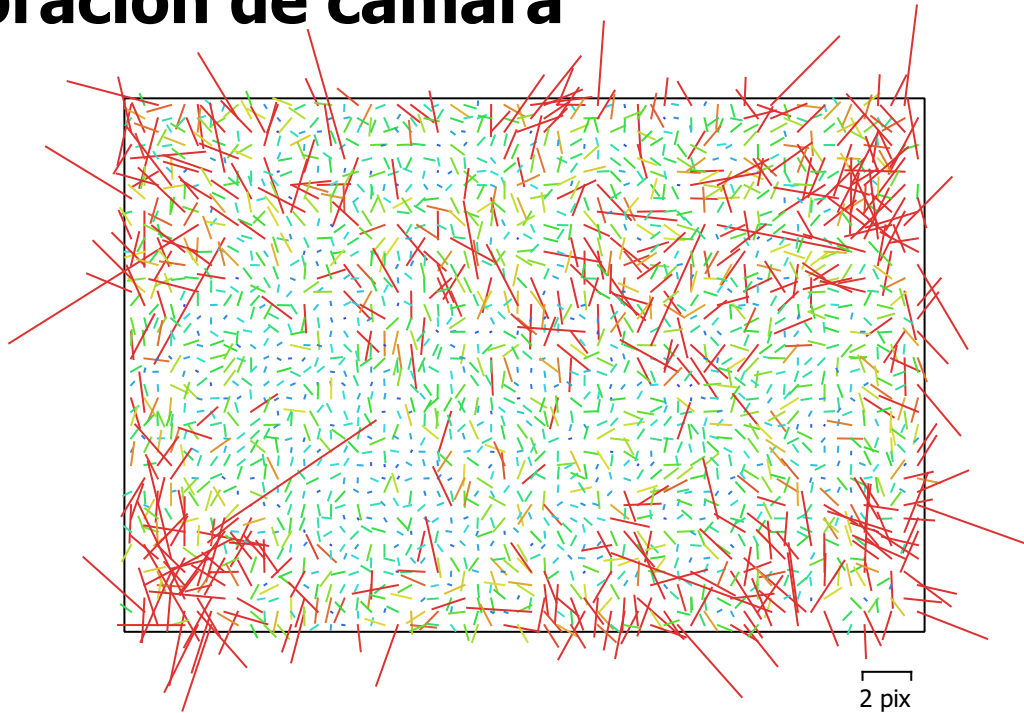


Fig. 14. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (16 mm).

Canon EOS M100 (16 mm)

8 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 6000 x 4000 | 16 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 4216.19 | 0.31 | 1.00 | -0.16 | 0.09 | -0.28 | -0.20 | -0.65 | 0.60 | -0.54 | 0.49 | -0.07 | 0.07 |
| Cx | -16.5279 | 0.4 | | 1.00 | -0.04 | 0.19 | 0.17 | 0.01 | 0.00 | -0.01 | 0.02 | 0.93 | -0.00 |
| Cy | 14.7453 | 0.4 | | | 1.00 | -0.23 | 0.11 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | -0.05 | 0.82 |
| B1 | 2.39145 | 0.1 | | | | 1.00 | 0.09 | 0.03 | -0.03 | 0.03 | -0.02 | 0.14 | -0.19 |
| B2 | -0.00259398 | 0.11 | | | | | 1.00 | -0.01 | 0.01 | -0.02 | 0.03 | 0.09 | 0.09 |
| K1 | -0.150189 | 0.00084 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.93 | -0.87 | 0.02 | 0.00 |
| K2 | 0.204044 | 0.0046 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.95 | -0.01 | 0.01 |
| K3 | -0.206647 | 0.0096 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | -0.00 | -0.01 |
| K4 | 0.115731 | 0.0068 | | | | | | | | | 1.00 | 0.01 | 0.01 |
| P1 | -0.000780196 | 2.6e-05 | | | | | | | | | | 1.00 | -0.01 |
| P2 | 0.000664923 | 2.2e-05 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 14. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Calibración de cámara

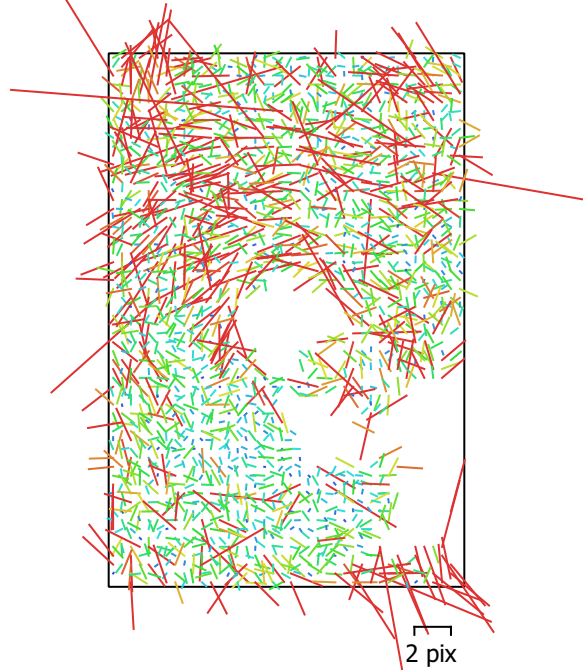


Fig. 15. Gráfico de residuales para Canon EOS M100 (28 mm).

Canon EOS M100 (28 mm)

3 imágenes

| | | | |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Tipo | Resolución | Distancia focal | Tamaño de píxel |
| Cuadro | 4000 x 6000 | 28 mm | 3.72 x 3.72 micras |

| | Valor | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | K4 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 7387.92 | 1.4 | 1.00 | -0.03 | -0.26 | -0.19 | 0.12 | -0.55 | 0.62 | -0.58 | 0.55 | -0.07 | -0.35 |
| Cx | 52.2923 | 3.8 | | 1.00 | 0.08 | -0.04 | -0.72 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | -0.02 | 0.98 | 0.08 |
| Cy | -17.3083 | 5.1 | | | 1.00 | 0.50 | -0.20 | -0.18 | 0.09 | -0.07 | 0.05 | 0.10 | 0.98 |
| B1 | -0.0327917 | 0.32 | | | | 1.00 | -0.03 | -0.10 | 0.05 | -0.03 | 0.02 | -0.06 | 0.52 |
| B2 | -2.95772 | 0.36 | | | | | 1.00 | 0.03 | -0.01 | 0.00 | -0.00 | -0.72 | -0.20 |
| K1 | -0.0232515 | 0.0071 | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.92 | -0.88 | -0.00 | -0.20 |
| K2 | 0.349179 | 0.11 | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.96 | -0.01 | 0.10 |
| K3 | -1.10589 | 0.72 | | | | | | | | 1.00 | -0.99 | 0.01 | -0.07 |
| K4 | 2.29022 | 1.6 | | | | | | | | | 1.00 | -0.02 | 0.05 |
| P1 | 0.00311609 | 0.00026 | | | | | | | | | | 1.00 | 0.10 |
| P2 | -0.000431669 | 0.00035 | | | | | | | | | | | 1.00 |

Tabla 15. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

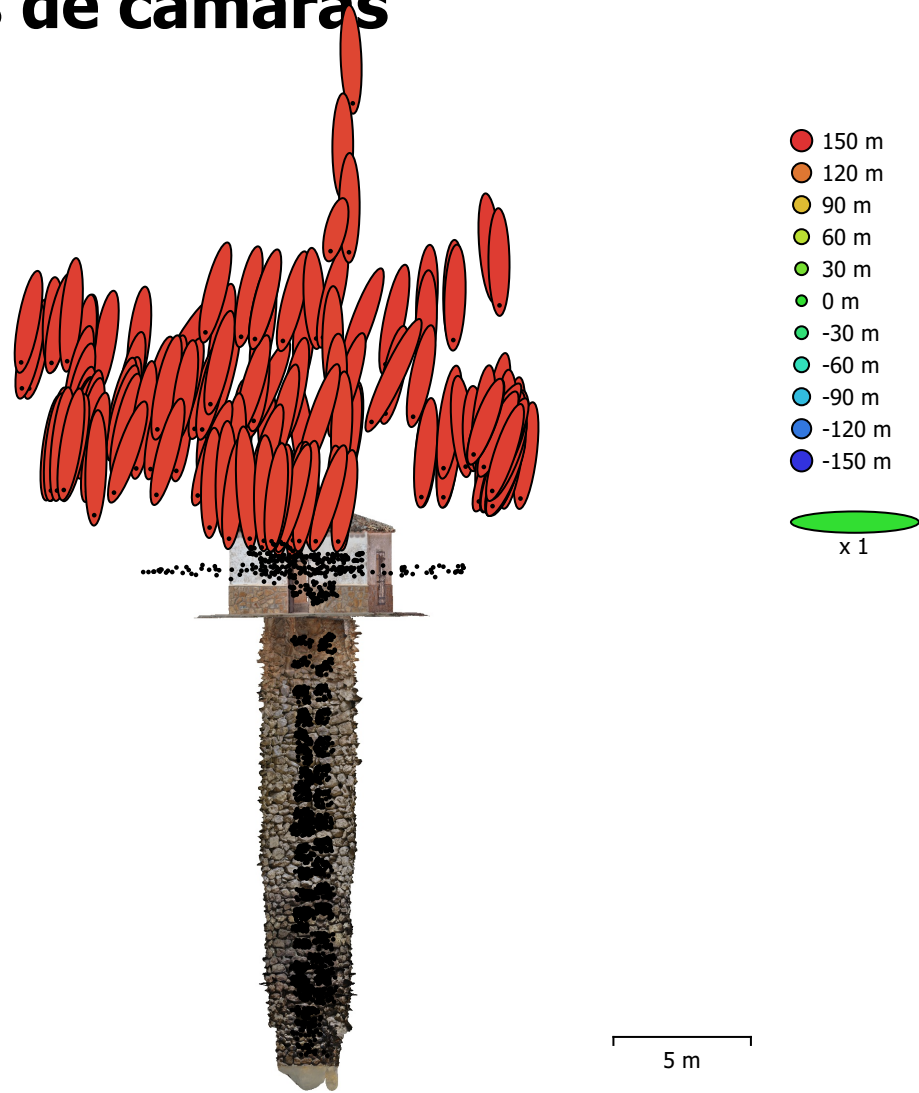


Fig. 16. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

| Error en X (m) | Error en Y (m) | Error en Z (m) | Error en XY (m) | Error combinado (m) |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 0.625684 | 2.96757 | 143.675 | 3.03281 | 143.707 |

Tabla 16. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Puntos de control terrestre



Fig. 17. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

| Número | Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Error en XY (cm) | Total (cm) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|
| 3 | 19.959 | 17.4206 | 0.582425 | 26.4922 | 26.4986 |

Tabla 17. ECM de puntos de apoyo.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

| Nombre | Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Total (cm) | Imagen (pix) |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| point 3 | 5.37274 | 23.3601 | -0.274831 | 23.9716 | 0.239 (17) |
| point 1 | -26.6832 | -4.88598 | -0.818299 | 27.1392 | 0.284 (23) |
| point 2 | 21.3125 | -18.4624 | 0.522026 | 28.202 | 0.218 (15) |
| Total | 19.959 | 17.4206 | 0.582425 | 26.4986 | 0.254 |

Tabla 18. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

| Nombre | Error en X (cm) | Error en Y (cm) | Error en Z (cm) | Total (cm) | Imagen (pix) |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| point 4 | | | | | 0.245 (77) |
| point 5 | | | | | 0.209 (91) |
| Total | | | | | |

Tabla 19. Puntos de control de calidad.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Medidas de distancia

| Nombre | Distancia (m) | Error (m) |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| point 4_point 5 | 5.90443 | 0.00443031 |
| Total | | 0.00443031 |

Tabla 20. Medidas de distancia de apoyo.

Modelo digital de elevaciones

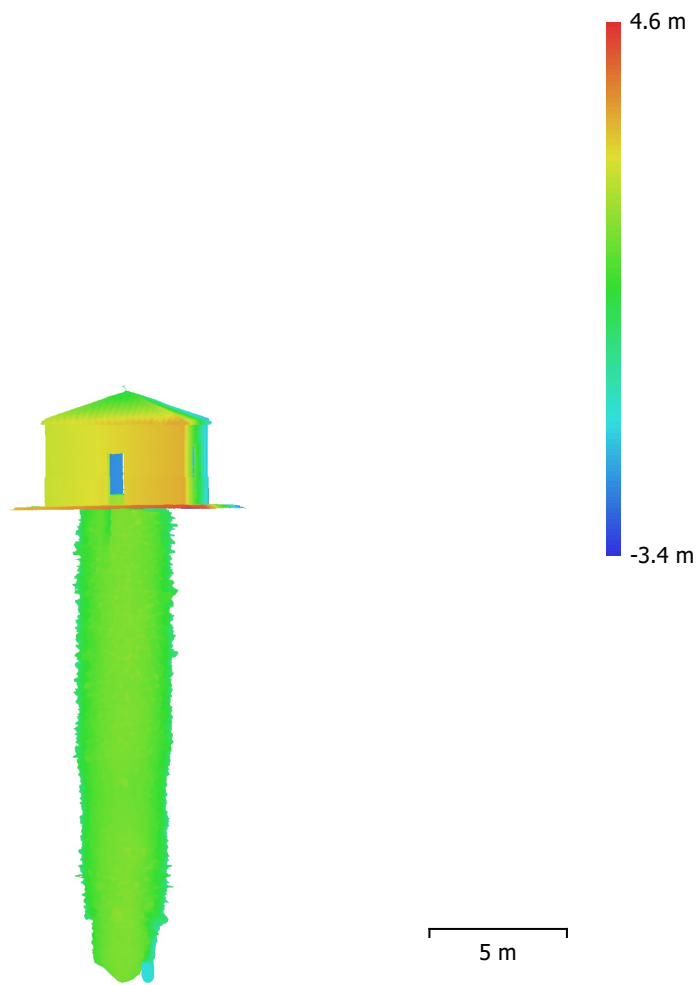


Fig. 18. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 1.67 cm/pix
Densidad de puntos: 0.357 puntos/cm²

Parámetros de procesamiento

Generales

| | |
|------------------------|--|
| Cámaras | 2871 |
| Cámaras orientadas | 2835 |
| Marcadores | 5 |
| Medidas de distancia | 1 |
| Sistema de coordenadas | ETRS89 / UTM zone 30N_Rednap_Alicante_Heigth |
| Ángulo de rotación | Guiñada, cabeceo, alabeo |

Puntos de paso

| | |
|---|------------------------|
| Puntos | 2,766,446 de 3,411,100 |
| RMS error de reproyección | 0.32326 (2.13063 pix) |
| Error de reproyección máximo | 2.30327 (57.6176 pix) |
| Tamaño promedio de puntos característicos | 6.34491 pix |
| Colores de puntos | 3 bandas, uint8 |
| Puntos clave | No |
| Multiplicidad media de puntos de paso | 5.62862 |

Parámetros de orientación

| | |
|--|------------------------|
| Precisión | Máxima |
| Preselección genérica | Sí |
| Preselección de referencia | No |
| Puntos clave por foto | 60,000 |
| Límite de puntos clave por megapixel | 1,000 |
| Puntos de paso por foto | 6,000 |
| Filtrar puntos por máscaras | Sí |
| Enmascarar puntos de paso | No |
| Excluir puntos de paso inmóviles | Sí |
| Emparejamiento guiado | No |
| Ajuste adaptativo del modelo de cámara | No |
| Tiempo búsqueda de emparejamientos | 17 horas 23 minutos |
| Uso de memoria durante el emparejamiento | 7.96 GB |
| Tiempo de orientación | 45 minutos 39 segundos |
| Uso de memoria durante el alineamiento | 5.39 GB |

Parámetros de optimización

| | |
|--|----------------------------------|
| Parámetros | f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2 |
| Ajuste adaptativo del modelo de cámara | Sí |
| Tiempo de optimización | 1 minuto 14 segundos |
| Fecha de creación | 2024:08:12 12:52:36 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 366.41 MB |

Mapas de profundidad

| | |
|--------|------|
| Número | 2835 |
|--------|------|

Parámetros de obtención de mapas de profundidad

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |
| Tiempo de procesamiento | 6 horas 48 minutos |
| Uso de memoria | 9.86 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:12 21:02:48 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 17.62 GB |

Modelo

| | |
|--|---|
| Caras | 1,499,325 |
| Vértices | 751,504 |
| Colores de vértices | 3 bandas, uint8 |
| Textura | 4,096 x 4,096, 4 bandas, uint8 |
| Parámetros de obtención de mapas de profundidad | |
| Calidad | Alta |
| Modo de filtrado | Leve |
| Límite máximo de redundancias | 16 |
| Tiempo de procesamiento | 6 horas 48 minutos |
| Uso de memoria | 9.86 GB |
| Parámetros de reconstrucción | |
| Tipo de superficie | Arbitrario |
| Origen de datos | Mapas de profundidad |
| Interpolación | Habilitada |
| Máscaras volumétricas estrictas | No |
| Tiempo de procesamiento | 4 horas 31 minutos |
| Uso de memoria | 21.79 GB |
| Parámetros de texturizado | |
| Modo de mapeado | Genérico |
| Modo de mezcla | Mosaico |
| Tamaño de textura | 4,096 |
| Habilitar el cierre de agujeros | No |
| Habilitar el filtro de efecto fantasma | Sí |
| Tiempo de mapeado en UV | 1 minuto 21 segundos |
| uso de memoria para mapa UV | 2.31 GB |
| Tiempo de mezcla | 1 minuto 0 segundos |
| Uso de memoria durante la mezcla | 10.18 GB |
| Fecha de creación | 2024:08:13 01:29:57 |
| Versión del programa | 2.1.0.17214 |
| Tamaño de archivo | 124.12 MB |
| Sistema | |
| Nombre del programa | Agisoft Metashape Professional |
| Versión del programa | 2.1.0 build 17214 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 31.70 GB |
| CPU | 12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900H |
| GPU(s) | Intel(R) Iris(R) Xe Graphics NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti Laptop GPU |